

# 능동자기베어링계에서 외란관측기를 갖는 슬라이딩모드 제어

강민식<sup>†</sup>

## Sliding Mode Control with Disturbance Observer for An Active Magnetic Bearing System

Kang, Min Sig

Key Words: Active magnetic bearing(능동자기베어링), Sliding mode control(슬라이딩모드 제어), Disturbance Observer(외란관측기), Base disturbance(베이스 외란)

### Abstract

In this paper, a sliding mode control based on disturbance observer is proposed to attenuate disturbance responses in an active magnetic bearing system, which is subject to base motion. An algorithm for exactly decoupling the disturbance estimation dynamics from the sliding mode dynamics is developed. It is also shown that the proposed method preserves the robustness of the sliding mode and asymptotically achieves zero regulation error, in the presence of external disturbances and parametric uncertainties. The proposed control is applied to a 2-DOF active magnetic bearing system subject to base motion. The feasibility of the proposed technique is illustrated, and the results of an experimental demonstration are shown.

### 기호설명

$f_1, f_2$  : AMB-1, 2 위치에서 전자기력  
 $g$  : 중력가속도  
 $J$  : 축의 질량중심 기준 질량관성모멘트  
 $m$  : 축의 질량  
 $s$  : 슬라이딩 함수  
 $y_1, y_2$  : AMB-1, 2 위치에서 공극변화  
 $\ddot{x}_1, \ddot{x}_2$  : AMB-1, 2 위치에서 수직 가속도

### 1. 서 론

이동 차량에서 이동하는 물체를 추적하기 위한 목적으로 사용하는 조준경에는 거울이 고정된 고각축이 있다. 목표물 영상은 거울에 의해 반사되어 차량에 탑승한 운용자에게 제공된다. 따라서 이동 중에도 목표물 영상을 운용자에게 제공하기 위해서는 조준경의 시선(line of sight)이 항상 목표물을 정확히 추적할 수 있도록 고각축을 회전시켜야한다. 현재 조준경에서는 회전축이 기계적 베어링으로 지지되며, 축의 반경방향 진동을 억제하기 위해 축과 베어링은 선하중을 주어 조립된다. 이 선하중이 클 수록 강성은 높아지나, 반면에 축의 회전 마찰력은 증가하는 문제가 있다. 마찰은 비선형 특성을 갖고 있으며, 제어성능 저하요인으로 작용하며, 특히 조준경의 회전축과 같이 회전속도가 낮고 회전방향이 자주 바뀌는 경우 위치오차를 증가시키는 결과를 초래한다<sup>(1)</sup>. 본 연구에서는 이러한 마찰에 의한 제어 오차발생 문제를 근본적으로 해결코자 능동자기베어링(AMB, active magnetic bearing)을 조준경 고각축 지지에 사용코저 시도하였다.

자기베어링을 사용할 경우 마찰 문제를 완벽

---

<sup>†</sup> 책임저자의 소속 : 경원대학교 기계공학과  
 E-mail : mskang@kyungwon.ac.kr  
 TEL : (031)750-5524 FAX : (031)750-5273

---

히 해결할 수 있으며, 또한 베어링의 동특성을 제어에 의해 자유로이 조정할 수 있으므로 안정화 성능 향상을 기대할 수 있다. 그러나 차량 이동에 따른 베이스 운동에도 불구하고 축과 전자석 사이의 간격을 일정하게 유지시켜야 되는 새로운 문제를 해결해야 된다.

AMB 시스템에서 베이스 운동의 영향을 감소시키기 위해 되먹임제어를 통해 베어링계의 대역폭을 증가시키거나<sup>(2,3)</sup>, 베이스의 가속도를 측정하여 베이스 운동의 영향을 보상하는 가속도 앞먹임제어를 들 수 있다<sup>(4)</sup>. 그러나 되먹임제어를 이용한 대역폭 증가는 계의 공진현상을 유발할 수 있으며, 외부 잡음에 대한 민감도가 증가하는 문제를 야기하기도 한다. 가속도 앞먹임 제어의 경우 베이스 외란의 영향을 제어력의 증가 없이 효과적으로 제거할 수 있으나 베이스의 가속도를 측정해야되는 부담이 있다.

따라서 본 연구에서는 베이스 외란을 측정하지 않고 외란 응답의 감소를 위해 외란 관측기를 갖는 슬라이딩모드제어(SMC: sliding mode control)를 적용코자 한다. SMC는 시스템의 동특성과 무관하게 설계자가 제어 목적에 적합하게 슬라이딩 평면을 정의할 수 있고, 계의 상태들이 평면에 유지시킬 수 있다. 또한 계의 파라미터 변화나 모델링되지 않은 동특성, 외란 등이 정합불확실성(matched uncertainty) 조건을 만족하면 제어기 성능은 이들과 무관하게 결정할 수 있는 불변성을 갖는다. 이러한 장점에 의해 널리 연구되고 있는 비선형제어방법의 하나이다<sup>(5)</sup>. AMB계에 SMC를 적용한 연구는 대부분 전자기력의 비선형성을 계의 불확실성으로 간주하여 제어하는 경우나 간단한 스텝 형태의 외란에 대한 제어가 대부분이며, 본 연구에서와 같이 외란 응답이 주 초점인 연구는 미진한 편이다<sup>(6)</sup>.

외란을 추정하는 방법은 전형적인 관측기를 이용하는 방법에서부터 능동적 추정 등의 방법이 소개되고 있으며, SMC에서 적용되고 있는 외란 관측 방법은 외란의 주파수 특성에 적합한 필터를 이용하는 방법, 슬라이딩 함수를 저역통과필터를 이용하는 방법, 상태추정기를 이용한 외란 추정 방법 등이 적용되어 왔다.

이상의 논의를 바탕으로 전자기베어링계를 대상으로 베이스 외란관측기를 제안하고, 폐회로 극점배치 방식의 슬라이딩모드 제어기를 제안하

였으며, 2-자유도 전자기베어링계에 적용하여 그 적용성 및 성능을 규명하였다.

## 2. 시스템 모델

대상 전자기베어링계는 Fig.1과 같이 축의 양단을 각각 수직방향의 전자기베어링으로 부양한 축계이며, 축의 수직평면에서의 운동만을 허용토록 축의 양단을 고강도 선으로 구속시켰다.

Fig. 1의 실험장치는 축 중심을 기준으로 좌우가 대칭이며, 좌측과 우측에는 각각 한 쌍의 전자석, 전자석과 축과의 간격을 측정하기 위한 변위센서, 전자석에 전류를 공급하는 전력 증폭기, 전자석의 베이스 운동을 제공하는 가진기가 대칭으로 설치되었다. 계의 제어는 DSP(digital signal processor)보드를 장착한 컴퓨터에 의해 이루어진다. 가진기는 외부의 신호에 따라 임의의 형태로 베이스 운동을 만들 수 있다.

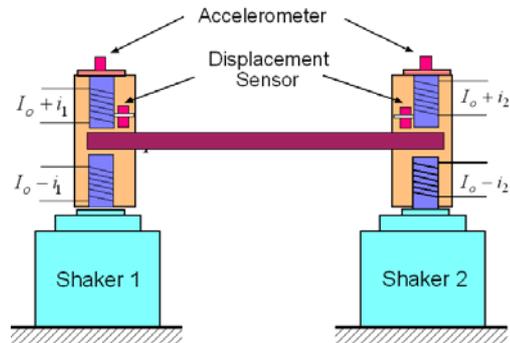


Fig. 1 Schematic diagram of magnetic bearing system

Fig. 1에 있는 축의 운동방정식은 다음과 같다.

$$\frac{m}{4} \begin{Bmatrix} \ddot{y}_1 + \ddot{y}_2 + \ddot{z}_1 + \ddot{z}_2 \\ \ddot{y}_1 + \ddot{y}_2 + \ddot{z}_1 + \ddot{z}_2 \end{Bmatrix} - \frac{J}{4a^2} \begin{Bmatrix} -\ddot{y}_1 + \ddot{y}_2 - \ddot{z}_1 + \ddot{z}_2 \\ \ddot{y}_1 - \ddot{y}_2 + \ddot{z}_1 - \ddot{z}_2 \end{Bmatrix} + \frac{mg}{2} \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} f_1 \\ f_2 \end{Bmatrix} \quad (1)$$

여기서 m과 J는 각각 축의 질량과 무게중심점 기준 질량관성모멘트이며,  $y_1$ 과  $y_2$ 는 축과 전자석의 공칭공극 기준 공극의 변화이며,  $\ddot{z}_1$ 과  $\ddot{z}_2$ 는 전자석의 수직방향 가속도,  $f_1$ 과  $f_2$ 는 전자석에 의해 축에 전달되는 전자기력을 나타낸다. 부호

의 하첨자 1, 2는 각각 좌측과 우측의 전자석 위치를 나타낸다.  $g$ 는 중력가속도이며,  $a$ 는 축의 무게중심점에서 각 전자석까지의 거리이다.

전자석에서 축에 전달되는 전자기력은 각 전자석이 Fig. 1과 같이 쌍으로 설치되고, 코일에 바이어스 전류를 공급할 경우 다음과 같이 선형화할 수 있다.

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

여기서  $K_d$ 는 위치강성,  $K_i$ 는 전류강성이다.

이러한 선형화 방법을 식(1)의 전자기력  $f_1, f_2$ 에 적용하고 정리하면

$$\begin{aligned} & \begin{Bmatrix} \ddot{y}_1 \\ \ddot{y}_2 \end{Bmatrix} - \frac{1}{mJ} \begin{bmatrix} K_{d1}(J+ma^2) & K_{d2}(J-ma^2) \\ K_{d1}(J-ma^2) & K_{d2}(J+ma^2) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{Bmatrix} \\ &= \frac{K_a}{mJ} \begin{bmatrix} K_{i1}(J+ma^2) & K_{i2}(J-ma^2) \\ K_{i1}(J-ma^2) & K_{i2}(J+ma^2) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} \ddot{z}_1 + g \\ \ddot{z}_2 + g \end{Bmatrix} \quad (3) \end{aligned}$$

Fig. 1에서 좌측과 우측의 전자기베어링을 각각 AMB-1, AMB-2라 하면,  $K_{d1}, K_{d2}$ 와  $K_{i1}, K_{i2}$ 는 각각 AMB-1과 AMB-2의 위치강성과 전류강성을 나타낸다.  $K_a$ 는 전자석에 전류를 공급하는 전력증폭기 이득으로 증폭기의 대역폭이 충분히 커서  $i_c = K_a v$ 와 같이 증폭기 입력전압과 전류 출력은 비례하는 것으로 가정한다. 여기서 AMB-1과 AMB-2에 사용된 전력증폭기는 그 특성이 같도록 설계하였다.  $u_1$ 과  $u_2$ 는 각각 AMB-1과 AMB-2의 전력증폭기에 입력되는 제어전압이다.

식(3)에서와 같이 강성행렬이 부한정(negative definite)이므로 이 계는 불안정하며, 베이스 가속도는 동적 외란, 자중은 정적외란으로 작용함을 알 수 있다. 따라서 이 시스템에서 제어의 목표는 계를 안정화시키고 베이스와 자중에 의한 공극의 변화를 최소화시키는데 있다.

### 3. 슬라이딩모드제어

식(1)로 주어지는 계는 일정한 크기의 외란으로 작용하는 축의 중력에 의한 정상상태 오차를 제거하기 위해 적분제어가 필요하다. 따라서 적분기가 포함된 상태회환제어를 위해 식(1)의 계를 다음의 상태공간방정식으로 나타낸다.

$$\dot{x} = Ax + Bu + Ed \quad (4)$$

여기서 상태변수, 입력벡터, 외란벡터 및 시스템 행렬은 각각 다음과 같이 정의된다.

$$x = [ \int y_1 dt \int y_2 dt \ y_1 \ y_2 \ \dot{y}_1 \ \dot{y}_2 ]^T,$$

$$u = [u_1 \ u_2]^T, \quad d = -[\ddot{z}_1 + g \ \ddot{z}_2 + g]^T$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & k_{11} & k_{12} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k_{21} & k_{22} & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ u_{11} & u_{12} \\ u_{21} & u_{22} \end{bmatrix}, \quad E = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ -1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}$$

$$k_{11} = K_{d1}(J+ma^2)/mJ, \quad k_{12} = K_{d2}(J-ma^2)/mJ$$

$$k_{21} = K_{d1}(J-ma^2)/mJ, \quad k_{22} = K_{d2}(J+ma^2)/mJ$$

$$u_{11} = K_a K_{i1}(J+ma^2)/mJ, \quad u_{12} = K_a K_{i2}(J-ma^2)/mJ$$

$$u_{21} = K_a K_{i1}(J-ma^2)/mJ, \quad u_{22} = K_a K_{i2}(J+ma^2)/mJ$$

식(7)에서 계의 특성을 규정하는 주된 파라미터는 전자기력을 나타내는 위치강성과 전류강성이다. 이 강성들은 식(2)에서와 같이 선형화 되었으므로 선형화 오차가 존재한다. 따라서 이 강성들의 오차를 고려하여 시스템 행렬 요소들을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$k_{ij} = \bar{k}_{ij} + \Delta k_{ij}, \quad u_{ij} = \bar{u}_{ij} + \Delta u_{ij}, \quad i, j = 1, 2 \quad (5)$$

여기서  $\bar{k}_{ij}$ 와  $\bar{u}_{ij}$ 는 공칭값 또는 아는 값,  $\Delta k_{ij}$ 와  $\Delta u_{ij}$ 는 오차 또는 불확실성을 나타낸다. 이를 이용하여 식(6)을 다시 쓰면

$$\dot{x} = \{A_o + \Delta A\}x + \{B_o + \Delta B\}u + Ed \quad (6)$$

$$A_o = \begin{bmatrix} [0]_{4 \times 6} \\ 0 & 0 & \bar{k}_{11} & \bar{k}_{12} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \bar{k}_{21} & \bar{k}_{22} & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad B_o = \begin{bmatrix} [0]_{4 \times 2} \\ \bar{u}_{11} & \bar{u}_{12} \\ \bar{u}_{21} & \bar{u}_{22} \end{bmatrix}$$

식(6)에서  $A_o$ 와  $B_o$ 는 알고있는 값으로 이루어진 시스템 행렬로 ( $A_o, B_o$ )는 가제어성을 만족하는 것으로 가정한다. 또한  $\Delta A$ 와  $\Delta B$ 는 불확실성을 포함한다.  $\Delta A, \Delta B, Ed$ 의 구조적 특성은 식(7)과 같은 정합조건(match condition)을 만족한다.

$$\Delta A = B_o \xi, \quad \Delta B = B_o f, \quad Ed = B_o \eta \quad (7)$$

따라서 식(6)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{x} = A_o x + B_o u + B_o v \quad (8)$$

$$v = \xi + f + \eta$$

여기서  $v$ 는 계의 불확실한 요소와 외란을 합한 총체적 외란에 해당한다.

### 3.1 외란관측기를 갖는 슬라이딩모드제어

슬라이딩모드 제어기 설계를 위해 슬라이딩 평면  $\sigma(t)$ 를 다음과 같이 정의하면, 슬라이딩 제어는 계의 상태를 이 슬라이딩 평면  $\sigma(t) = Sx(t)$ 에 유지시키도록 한다. 슬라이딩 제어입력  $u(t)$ 는 다음과 같이 두 부분으로 구성된다.

$$u(t) = u_{eq}(t) + u_n(t) \quad (9)$$

여기서  $u_{eq}(t)$ 은 식(8)에서 총체적 외란  $v(t) = 0$ 인 경우 등가제어입력(equivalent control input)으로 일단 계의 상태가 슬라이딩 평면에 도달되면 그 후 항상 그 평면에 존재하도록 하는 입력이며,  $u_n(t)$ 은  $v(t) \neq 0$ 인 경우 계의 상태를 슬라이딩 평면에 도달되도록 하는 불연속적 도달 제어입력(reaching control input)이다.

일단 슬라이딩 평면에 도달되면  $\sigma(t) = \dot{\sigma}(t) = 0$ 을 만족하므로 등가제어입력은 슬라이딩 평면의 미분을 영으로 하여 구한다.

따라서 등가제어입력은 다음으로 결정된다.

$$u_{eq}(t) = -(SB_o)^{-1} SA_o x(t) \quad (10)$$

여기서  $SB_o$ 는 비특이(nonsingular) 행렬로 가정한다. 나머지 도달제어입력을 다음과 같이 정의하면

$$u_n(t) = (SB_o)^{-1} \Phi \sigma(t) - (SB_o)^{-1} k \operatorname{sgn}[\sigma(t)] - \hat{v}(t) \quad (11)$$

여기서  $\operatorname{sgn}[h(t)]$ 는 부호함수이다.

식(10)과 (11)의 제어기를 적용한 경우 폐회로 슬라이딩 함수는 다음과 같다.

$$\dot{\sigma}(t) = \Phi \sigma(t) - k \operatorname{sgn}[\sigma(t)] + SB_o \tilde{v}(t) \quad (12)$$

여기서  $\hat{v}(t)$ 는  $v(t)$ 의 추정이며,  $\tilde{v}(t)$ 는 추정오차로  $\tilde{v}(t) = v(t) - \hat{v}(t)$ 이다. 총체적 외란은 다음 식으로 추정한다.

$$\begin{aligned} \hat{v}(t) = & -G(SB_o)^{-1} \sigma(t) + G(SB_o)^{-1} \Phi \int \sigma(t) dt \\ & - G(SB_o)^{-1} k \int \operatorname{sign}[\sigma(t)] dt \end{aligned} \quad (13)$$

따라서 외란추정 방정식은 다음으로 정리된다.

$$\dot{\hat{v}}(t) = G\tilde{v}(t) + \dot{v}(t) \quad (14)$$

식(12)와 (14)를 정리하면

$$\begin{Bmatrix} \dot{\sigma}(t) \\ \dot{\hat{v}}(t) \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \Phi & SB_o \\ 0 & G \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma(t) \\ \hat{v}(t) \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} -k \operatorname{sgn}[\sigma(t)] \\ \dot{v}(t) \end{Bmatrix} \quad (15)$$

식(15)에서 슬라이딩모드 동력학과 외란관측오차 동력학은 서로 비연성이고, 안정성은 각각  $\det[sI - \Phi]$ 와  $\det[sI - G]$ 의 근에 의해 결정됨을 알 수 있다. 즉, 슬라이딩모드 동력학과 외란관측기의 동력학은 각각 행렬  $\Phi$ 와  $G$ 를 독립적으로 설계하여 정할 수 있다.

만일 총체적 외란의 도함수의 범위가 한정되어 있고,  $\|\dot{v}(t)\| \leq \delta$ ,  $\delta \geq 0$ , 행렬  $\Phi$ 와  $G$ 가 안정하면 식(15)의 폐회로는 안정하며, 다음을 만족하는  $k$ 가 존재한다.

$$\|SB_o \tilde{v}(t)\| \leq k, k \geq 0 \quad (16)$$

제어입력의 슬라이딩평면 도달법칙은 다음 도함수가 음이 되면 만족된다.

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) &= \sigma(t)^T \dot{\sigma}(t) \\ &= \sigma(t)^T [\Phi \sigma(t) - k \operatorname{sgn}[\sigma(t)] + SB_o \tilde{v}(t)] \end{aligned} \quad (17)$$

따라서 행렬  $\Phi$ 가 안정하면 식(16)의 관계에서 이 도함수는 음이 되어 도달법칙을 만족한다.

식(13)의 추정식은 디지털 컴퓨터에서 실현되므로 이를 위해 이산시간에서 외란관측기를 표현해야 된다. 이 변환에 Backward rectangular 법칙을 적용하여 근사화 하면

$$\begin{aligned} \hat{v}(k) &= \hat{v}(k-1) - G(SB_o)^{-1} [\sigma(k) - \sigma(k-1)] \\ &+ TG(SB_o)^{-1} \Phi \sigma(k) - TGk \operatorname{sign}[B_o^T S^T \sigma(k)] \end{aligned} \quad (18)$$

여기서  $T$ 는 샘플링 간격이다.

앞의 제어기에서 부호함수는 실제 적용 시 응답에 체터링(chattering)을 야기한다. 따라서 이 부호함수 대신 다음의 근사식을 사용하여 체터링을 방지할 수 있다.

$$\lambda \operatorname{sign}[f(t)] \cong \lambda \frac{f(t)}{\|f(t)\| + \varepsilon}, \varepsilon \geq 0 \quad (19)$$

이 제어기는 실제 릴레이(relay)제어의 근사에 해당하며, 슬라이딩모드 제어기와는 차이가 있지만,  $\lambda$ 가 클 경우 슬라이딩모드 제어의 안정성을 보장할 수 있다<sup>(7)</sup>.

3.2 폐회로 극점배치 특성

식(10)과 (11)의 제어기에서 선형되먹임제어부를  $u_L$ 이라 하면 다음과 같다.

$$u(t) = -(SB_o)^{-1}SA_o x(t) + (SB_o)^{-1}\Phi\sigma(t) \quad (20)$$

이 제어기는 상태되먹임제어기로 일반적인 PID-제어기 형태를 갖는다. 이를 외란과 모델링 오차를 제외한 선형모델에 적용할 경우 슬라이딩 함수는 다음의 특성을 갖게 된다.

$$\dot{\sigma}(t) = \Phi\sigma(t) \quad (21)$$

따라서 슬라이딩 함수는 행렬  $\Phi$ 의 특이값에 따라 안정성과 수렴성이 결정된다.

본 시스템에서 제어 목적은 축의 진동을 억제하는데 있으므로 다음과 같이 슬라이딩 평면을 규정하는 행렬  $S$ 와 행렬  $\Phi$ 를 다음과 같이 설정할 수 있으며,

$$S = \begin{bmatrix} \lambda_{11}\lambda_{12} & 0 & (\lambda_{11} + \lambda_{12}) & 0 & 1 & 0 \\ 0 & \lambda_{21}\lambda_{22} & 0 & (\lambda_{21} + \lambda_{22}) & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\Phi = \begin{bmatrix} \phi_1 & 0 \\ 0 & \phi_2 \end{bmatrix}$$

이 관계를 식(20)에 대입하고, 다시 식(8)에 대입하여 그 결과를 구체적으로 정리하면 다음 관계를 얻는다.

$$\begin{cases} \lambda_{11}\lambda_{12}\dot{x}_1 + (\lambda_{11} + \lambda_{12})\dot{x}_3 + \dot{x}_5 = -\phi_1 \{ \lambda_{11}\lambda_{12}x_1 + (\lambda_{11} + \lambda_{12})x_3 + x_5 \} \\ \lambda_{21}\lambda_{22}\dot{x}_2 + (\lambda_{21} + \lambda_{22})\dot{x}_4 + \dot{x}_6 = -\phi_2 \{ \lambda_{21}\lambda_{22}x_2 + (\lambda_{21} + \lambda_{22})x_4 + x_6 \} \end{cases} \quad (22)$$

식(22)에 상태변수의 정의를 적용하여 재정리하

고 라플라스변환을 하면 폐회로의 동력학은 다음으로 주어진다.

$$\begin{cases} (s + \phi_1)(s + \lambda_{11})(s + \lambda_{12})\frac{Y_1(s)}{s} = 0 \\ (s + \phi_2)(s + \lambda_{21})(s + \lambda_{22})\frac{Y_2(s)}{s} = 0 \end{cases} \quad (23)$$

여기서  $Y_1(s)$ 와  $Y_2(s)$ 는 각각  $y_1(t)$ 와  $y_2(t)$ 의 라플라스 변환이다. 식(23)이 나타내는 것은 이 제어에 의해  $y_1$ 과  $y_2$ 의 폐회로 동력학은 서로 비연성화시킬 수 있으며, 각각의 폐회로의 극점은 슬라이딩 평면을 정의하는 행렬  $S$ 와 행렬  $\Phi$ 에 의해 직접적으로 결정됨을 알 수 있다. 또한 좌변의 적분기에 의해 임의의 상수항으로 나타나는 외란이나 모델링 오차에 의한 정상상태 오차가 제거됨을 알 수 있다.

4. 실험결과 및 논의

앞에서 제안된 제어기 설계방법의 적용성을 검증하기 위해 Fig. 1의 실험장치를 이용하여 실험하였다. Fig. 2는 베이스가 40Hz의 단순조화함수일 경우 공극  $y_1$ 이다. 크게 3-부분으로 나뉘어지는데, 첫 번째 부분은 선형 PID-제어만을 적용한 경우, 두 번째는 슬라이딩모드 제어만 적용한 경우, 마지막 부분은 외란관측기를 이용한 슬라이딩모드 제어시 응답을 보인다. 슬라이딩모드제어가 PID-제어 성능에 비해 우수하며, 외란관측기를 적용한 경우 응답이 더 개선됨을 알 수 있다.

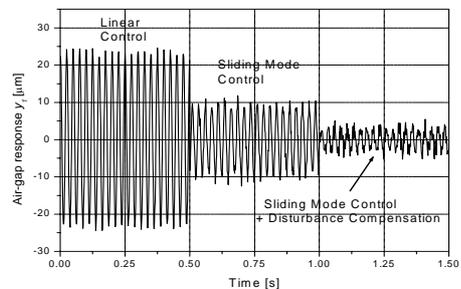


Fig. 2 Air-gap response  $y_1$  under base motion of frequency 40Hz

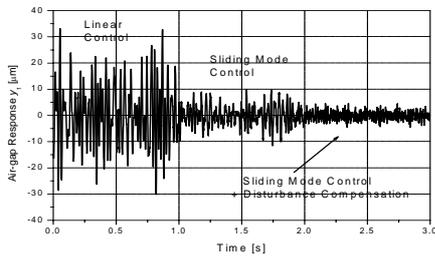


Fig. 3 Air-gap response  $y_l$  under random base motion

Fig. 3는 베이스 가진이 10-50Hz의 주파수 대역을 갖는 랜덤 신호에 해당될 경우 공극  $y_l$ 이다. Fig. 2의 결과와 유사함을 알 수 있다. Fig. 4는 Fig. 3의 각 부분의 응답의 스펙트럼을 구한 것으로 가진 주파수 대역 전체에서 외란관측기를 적용한 경우 외란에 의한 응답의 크기가 감소되었음을 확인할 수 있다.

이상의 결과를 통해 본 연구에서 제안된 외란관측기를 갖는 슬라이딩모드제어의 적용성과 성능을 확인할 수 있다.

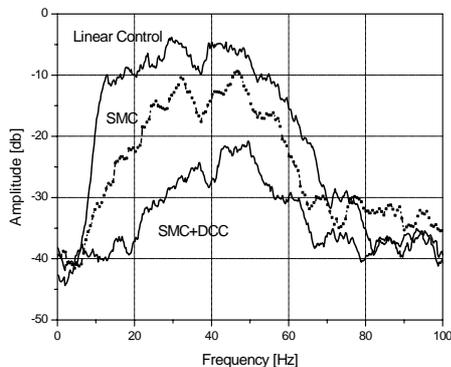


Fig. 4 Spectra of air-gap response  $y_l$  under random disturbance

## 5. 결론

마찰에 의한 조준경의 안정화 성능 저하를 극복하기 위해 조준경 고각축에 기존의 기계적 베어링 대신 마찰 없이 축을 지지할 수 있는 전자기 베어링을 적용하였다. 전자기 베어링 적용시

베이스 가진에 의한 축의 떨림은 안정화 성능을 저하시키는 문제를 야기하는데, 이 문제를 해결하기 위해 새로운 외란관측기를 갖는 슬라이딩제어를 제안하였다. 제안된 방법은 2-자유도 전자기베어링계에 적용하였으며, 실험결과를 통해 제안된 제어가 외란응답 제거에 효과적임을 입증하였다.

## 참고문헌

- (1) Armstrong, B., Dupont, P., C. Canudas De Wit, 1994, "A survey of models, analysis tools and compensation methods for control of machines with friction", *Automatica*, vol. 30, no. 7, pp.1083 ~ 1138.
- (2) 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.
- (3) 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.
- (4) Kang, M. S. and Jung, J. S., 2004, "Disturbance Compensation Control of An Active Magnetic Bearing System by Multiple FXLMS Algorithm-Experiment", *KSPE Journal*, Vol. 21, no. 2, pp. 83 ~ 91.
- (5) Edwards, C. and Spurgeon, S. K., 1998, *Sliding Mode Control - Theory and Application*, Taylor & Francis.
- (6) Shan, X. and Menq, C. H., 2002, "Robust disturbance rejection for improved dynamic stiffness of magnetic suspension stage", *IEEE/ASME Trans. on Mechatronics*, vol.7, no.3, pp.289 ~ 295.
- (7) Chan, L. M., Tao, C. W., and Lee, T. T., 2000, "Sliding mode controller for linear systems with mismatched time-varying uncertainties", *J. of the Franklin Institute*, vol. 337, pp. 105 ~ 115.