

자기베어링계에서 외란 관측기를 갖는 슬라이딩모드 제어

論 文

53D-6-4

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

姜 珉 埴*
(Min Sig Kang)

Abstract - In this paper, a disturbance observer based sliding mode control is proposed to attenuate disturbance responses in an active magnetic bearing system, which is subject to base motion. An algorithm which decouples disturbance observation dynamics from sliding mode dynamics is suggested. This algorithm preserves the robustness of the sliding mode control and satisfies reachability condition in the presence of external disturbance and parameter uncertainties. Along with experimental results, it is shown that the proposed control is effective in disturbance rejection without any additive disturbance measurement.

Key Words : Active magnetic bearing, Sliding mode control, Base disturbance, Disturbance observer

1. 서 론

능동자기베어링은 기존의 베어링에 비해 고유한 장점을 갖고 있어 산업계에 적용이 증가하는 추세에 있다. 특히 부하의 비접촉식 부양 및 동특성의 제어성과 같은 장점은 회전축의 지지, 정밀위치제어 등의 분야에서 활발히 연구되고 있다. 그러나 지금까지 전자기베어링에 대한 연구는 주로 설치부가 정적인 상태를 대상으로 하였으며, 베이스가 움직이는 경우에 대한 연구는 아직 미진한 편이다. 전자기베어링이 점차 이동운반체에 설치되어 이용하는 예가 증가하는 추세에 비추어 베이스운동의 영향에 대한 연구가 필요하다. 정적인 상태에서 전자기베어링의 제어는 자중과 부양하중의 회전에 따른 원심력에 의한 공극변화의 제어에 주 관심을 두었으나, 베이스 운동을 고려할 경우 베이스의 가속도는 공극의 변화를 야기하는 외란으로 작용하여 위치정확도를 저해하며, 심한 경우 전자석과 부하의 충돌과 같은 문제가 야기될 수 있으므로 베이스 운동에 의한 외란응답의 효과적인 감소 방안이 필요하다.

AMB 시스템에서 베이스 운동의 영향을 감소시키기 위해 되먹임제어를 통해 베어링계의 대역폭을 증가시키거나[1, 2], 베이스의 가속도를 측정하여 베이스 운동의 영향을 보상하는 가속도 앞먹임제어를 들 수 있다[3-5]. 그러나 되먹임제어를 이용한 대역폭 증가는 계의 공진현상을 유발할 수 있으며, 외부 잡음에 대한 민감도가 증가하는 문제를 야기하기도 한다. 가속도 앞먹임제어의 경우 베이스 외란의 영향을 제어력의 증가 없이 효과적으로 제거할 수 있으나 베이스의 가속도를 측정해야 되는 부담이 있다.

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 상태를 이 평면에 유지시킬 수 있다. 또한 계의 파라미터 변화나 모델링 되지 않은 동특성, 외란 등이 정합불확실성(matched uncertainty) 조건을 만족하면 제어기 성능은 이들과 무관하게 결정할 수 있는 불변성을 갖는다[6, 7]. 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[8-10].

슬라이딩모드 제어에서 주요 관심사 중 하나는 채터링의 억제 또는 감소이다. 외란이 정합조건을 만족할 경우 불연속 제어에 의한 강인성을 부여할 수 있으나, 외란의 크기가 클 경우 채터링 발생에 주의해야 된다. 외란에 주안점을 두고 효과적인 슬라이딩 모드제어를 위한 방법은 크게 두 가지로 나눌 수 있는데, 첫째는 기존의 슬라이딩모드제어를 보완하는 방법과, 둘째는 외란을 추정하여 보상하는 방법을 들 수 있다. 전자는 도달과정에서의 외란에 대한 강인성을 부여하기 위해 기존의 슬라이딩 모드제어를 수정한 적분형 슬라이딩모드 제어[11], 또는 슬라이딩 함수의 적분과 미분을 제어에 포함시키는 방법[12] 등이 있으며, 후자는 계의 출력을 플랜트 역동력학 모델과 필터를 통과시켜 외란을 관측하는 외란관측기 기반 슬라이딩모드 제어[13], 계의 상태를 추정하는 다음 추정오차에 등가제어(equivalent control)방법[14]을 적용하는 방법[15], 외란을 직접 추정하여 보상하는 방법[16]을 들 수 있다.

본 연구에서는 외란을 직접 추정하여 보상하는 외란관측기 기반 슬라이딩제어와 쉽게 폐회로 극점배치를 이용한 선

* 正 會 員 : 景園大 工大 機械工學科 副敎授
接受日字 : 2004年 3月 15日
最終完了 : 2004年 4月 26日

형제어부의 설계방법을 제안하고자 한다. 특히 외란관측기 동력학과 슬라이딩모드 동력학을 분리하여 독립적으로 설계 가능한 구조를 제시한다.

제안된 방법의 적용성과 성능은 1-자유도 능동자기베어링계를 이용한 실험적 결과를 통해 입증한다.

2. 시스템 모델

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

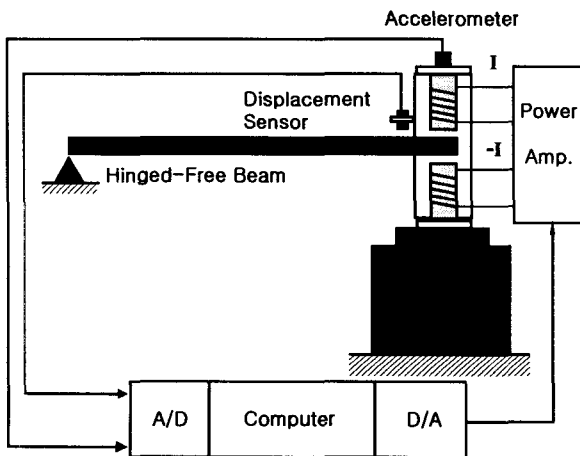


그림 1 실험장치 개념도
Fig. 1 Schematic diagram of test rig

이 AMB 시스템의 운동방정식은 다음과 같다.

$$J\ddot{\theta} = -\frac{L}{2}mg + x_a f_c \tag{1}$$

여기서 θ 는 보의 회전각, J 는 보의 힌지점 기준 질량관성모멘트, L 은 보의 길이, m 은 보의 질량, g 는 중력가속도, x_a 는 힌지점에서 AMB 위치까지의 거리, f_c 는 전자기력을 나타낸다. 전자석의 수직방향 변위를 z , 전자석과 보 사이의 공칭공극을 y_0 , 공칭공극 기준 변화공극을 y 라 하면 (앞으로 공극이라 칭함), 보의 회전각이 작을 경우 $x_a\theta = y_0 + y + z$ 의 관계가 성립되므로 식(1)은 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

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

전자석에 의해 보에 전달되는 전자기력은 코일에 흐르는 전류의 제곱에 비례하며, 공극의 제곱에 역비례 하는 관계를 갖지만 전자석이 보를 중심으로 반대쪽에 쌍으로 설치되고, 코일에 바이어스 전류가 공급될 경우 운용점(공칭공극, 바이어스 전류)을 기준으로 공극과 전류의 미소 변화를 가정하여 다음 식과 같이 선형화할 수 있다.

$$f_c = K_y y + K_i i_c \tag{3}$$

여기서 K_y 와 K_i 는 각각 AMB의 위치강성계수와 전류강성계수를 나타내며, i_c 는 바이어스 전류에 더해지는 제어전류를 나타낸다.

코일에 전류를 공급하는 전력증폭기는 전류피드백제어에 의해 대역폭을 충분히 높일 수 있으므로, 출력전류는 입력전압에 비례하는 것으로 가정할 수 있다. 즉,

$$i_c = K_a u \tag{4}$$

여기서 K_a 는 증폭기 이득이며, u 는 증폭기 입력전압이다.

식(3)과 (4)를 식(2)에 대입하여 다음의 운동방정식을 얻을 수 있다.

$$\ddot{y} - \frac{x_a^2 K_y}{J} y = \frac{x_a^2 K_a K_i}{J} u - \ddot{z} - \frac{x_a L}{2J} mg \tag{5}$$

이 AMB 시스템은 음의 강성을 가지므로 불안정하며, 보의 자중은 정적 외란으로, 베이스 가속도는 동적 외란으로 작용함을 알 수 있다. 이 계에서 제어의 목적은 자중과 베이스 운동에 의한 외란응답을 최소화하는 데 있다.

3. 슬라이딩모드 제어

식(5)의 계는 타입-0이므로 축의 중력에 의한 정상상태 오차를 제거하기 위해 적분제어가 필요하다. 따라서 적분기가 포함된 상태피드백제어를 위해 식(5)의 계를 다음의 상태공간방정식으로 나타낸다.

$$\dot{x} = Ax + Bu + Ed \tag{6}$$

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

$$x = [\int y dt \quad y \quad \dot{y}]^T$$

$$d = \ddot{z} + \frac{x_a L}{2J} mg \tag{7}$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & \frac{x_a^2 K_y}{J} & 0 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{x_a^2 K_a K_i}{J} \end{bmatrix}, \quad E = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix}$$

이 계의 특성을 규정하는 주된 파라미터는 위치강성, 전류강성 및 증폭기 이득을 들 수 있다. 특히 위치강성과 전류강성은 식(3)에서와 같이 선형화되었으므로 선형화 오차가 존재한다. 이 오차와 외란은 식(6)과 (7)의 시스템 특성에서 정합조건(match condition)을 만족함을 알 수 있다. 이 시스템 파라미터 불확실성과 외란을 모두 합하여 총체적 외란 v 라 하면 식(6)을 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

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

여기서 A_o, B_o 는 공칭값 또는 알고 있는 값으로 이루어진 시스템 행렬이며, (A_o, B_o) 는 가제어성(controllability)을 만족한다.

3.1 외란관측기를 갖는 슬라이딩제어 설계

슬라이딩모드 제어기 설계를 위해 슬라이딩 평면 $\sigma(t)$ 를 다음과 같이 정의하면, 슬라이딩 제어는 계의 상태를 이 슬라이딩 평면에 유지시키도록 한다.

$$\sigma(t) = Sx(t) \quad (9)$$

슬라이딩 제어입력 $u(t)$ 는 다음과 같이 두 부분으로 구성된다.

$$u(t) = u_{eq}(t) + u_n(t) \quad (10)$$

여기서 $u_{eq}(t)$ 은 식(8)에서 총체적 외란 $v(t) = 0$ 을 가정한 경우 결정되는 등가제어입력(equivalent control input)으로 일단 계의 상태가 슬라이딩 평면에 도달되면 그 후 항상 그 평면에 존재하도록 하는 입력이며, $u_n(t)$ 은 계의 상태를 슬라이딩 평면에 도달되도록 하는 불연속적 도달제어입력(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.

$$u_{eq}(t) = -(SB_o)^{-1} SA_o x(t) \quad (11)$$

여기서 SB_o 는 비특이(nonsingular) 행렬로 가정한다.

정리 - 분리법칙

식(8)의 계에 식(12)의 도달제어입력과 식(13)의 외란관측기를 적용한다.

$$u_n(t) = (SB_o)^{-1} \phi \sigma(t) - (SB_o)^{-1} k \operatorname{sgn}[\sigma(t)] - \hat{v}(t), \quad \phi < 0, k > 0 \quad (12)$$

$$\hat{v}(t) = -\mu(SB_o)^{-1} \sigma(t) + \mu(SB_o)^{-1} \phi \int \sigma(t) dt - \mu(SB_o)^{-1} k \int \operatorname{sgn}[\sigma(t)] dt \quad (13)$$

여기서 $\hat{v}(t)$ 는 $v(t)$ 의 추정이며, $\operatorname{sgn}[h(t)]$ 는 함수 $h(t)$ 의 부호를 나타낸다. 식(12)를 식(8)에 적용하여 폐회로 동력학을 구하고, 그 결과를 식(13)에 대입하면 식(14)와 같은 폐회로의 슬라이딩모드 동력학과 외란관측오차 동력학을 구할 수 있다.

$$\begin{cases} \dot{\sigma}(t) \\ \dot{\hat{v}}(t) \end{cases} = \begin{bmatrix} \phi & SB_o \\ 0 & \mu \end{bmatrix} \begin{cases} \sigma(t) \\ \hat{v}(t) \end{cases} + \begin{cases} -k \operatorname{sgn}[\sigma(t)] \\ \hat{v}(t) \end{cases} \quad (14)$$

여기서 $\tilde{v}(t)$ 는 추정오차로 $\tilde{v}(t) = v(t) - \hat{v}(t)$ 이다. 총체적 외란의 도함수의 범위가 한정되어 있으면 즉, $|\dot{v}(t)| \leq \delta, \delta \geq 0$, 슬라이딩 평면의 도달법칙을 만족하며, 폐회로의 슬라이딩모드 동력학과 외란관측오차 동력학은 안정하게 설계할 수 있고, 또한 각각의 동력학 특성은 서로 분리하여 설계할 수 있다.

증명

식(10), (11)과 (12)에서 제어기는 다음과 같으며,

$$u(t) = -(SB_o)^{-1} SA_o x(t) + (SB_o)^{-1} \phi \sigma(t) - (SB_o)^{-1} k \operatorname{sgn}[\sigma(t)] - \hat{v}(t) \quad (15)$$

슬라이딩함수 동력학은 식(8), (9), (15)를 이용하여 정리하면 다음과 같다.

$$\dot{\sigma}(t) = \phi \sigma(t) - k \operatorname{sgn}[\sigma(t)] + SB_o \tilde{v}(t) \quad (16)$$

또한 외란관측 동력학은 식(13)과 (16)에 의해 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\dot{\hat{v}}(t) = \mu \tilde{v}(t) + \dot{v}(t) \quad (17)$$

따라서 식(16), (17)의 결과를 정리하면 식(14)를 얻게 된다.

슬라이딩평면의 도달법칙 만족성을 평가하기 위해 Lyapunov 함수 $V(t) = 0.5 \sigma^2(t)$ 를 정의하면, 도달법칙은 이 함수의 도함수가 음이 되면 만족된다. 함수 $V(t)$ 의 도함수는 식(16)을 이용하면 다음과 같다.

$$\dot{V}(t) = \phi \sigma^2(t) - k \operatorname{sgn}[\sigma(t)] \sigma(t) + SB_o \tilde{v}(t) \sigma(t) \quad (18)$$

앞의 가정에서 총체적 외란의 도함수의 범위가 한정되어 있고, μ 가 음이면 외란관측기 동력학은 안정하므로 다음을 만족하는 k 가 존재한다.

$$|SB_o \tilde{v}(t)| \leq |SB_o| \|\tilde{v}(t)\| \leq k, k \geq 0 \quad (19)$$

식(19)를 만족하는 k 가 존재하면 식(18) 우변의 두 번째와 세 번째 항의 합은 음이며, 또한 ϕ 는 음의 값을 선정하므로 식(18)의 도함수는 음이 되어 슬라이딩 평면의 도달법칙을 만족한다. Q. E. D.

식(14)에서와 같이 슬라이딩함수와 관측오차동력학은 서로 분리되므로 각각의 동특성은 ϕ 와 μ 를 독립적으로 설계하여 정할 수 있다. 특히 외란관측기는 다음의 특성을 갖게 된다.

- (i) 외란관측기의 안정성 조건은 외란 자체의 크기가 아닌 외란의 도함수의 한정성 조건으로 주어진다.
- (ii) 총체적 외란이 상수일 경우 정상상태 관측오차는 영이다.
- (iii) 총체적 외란이 기울기 a 를 갖는 단순증가함수일 경우 정상상태 관측오차는 a/μ 로 주어지며, 따라서 μ 의 절대치가 클수록 관측오차를 줄일 수 있다.
- (iv) 총체적 외란이 주파수 ω 의 단순조화함수일 경우 정상상태 관측오차의 증폭비는 $\omega/\sqrt{\omega^2 + \mu^2}$, 위상변화는 $\pi/2 - \tan^{-1}(\omega/\mu)$ 로 주어진다.

(v) 식(19)에서 불연속 제어입력의 크기 k 는 오차의 절대적인 크기가 아닌 외란의 도함수와 외란관측기 설계 파라미터인 μ 에 의해 결정되므로 외란관측기가 없는 일반적인 슬라이딩모드 제어에 비해 그 크기를 줄일 수 있다. 불연속 제어입력의 크기가 작을수록 체터링이 작아지므로 따라서 외란관측기를 이용한 슬라이딩모드제어가 체터링 발생 감소에 효과적이라 할 수 있다.

식(13)의 외란관측기는 디지털 컴퓨터에서 실현되므로 이를 위해 이산시간에서 외란관측기를 표현해야 된다. Euler 법칙을 적용하여 근사화 하면 식(13)은 다음과 같이 변환된다.

$$\hat{v}(k) = \hat{v}(k-1) - \mu(SB_o)^{-1}[\sigma(k) - \sigma(k-1)] + T\mu(SB_o)^{-1}\phi\sigma(k) - T\mu(SB_o)^{-1}ksgn[\sigma(k)] \quad (20)$$

여기서 T 는 샘플링 간격이다.

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

$$\lambda \text{sign}[f(t)] \cong \lambda \frac{f(t)}{\|f(t)\| + \epsilon}, \epsilon \geq 0 \quad (21)$$

이 제어기는 실제 릴레이(relay)제어의 근사에 해당하며, 슬라이딩모드 제어기와는 차이가 있지만, λ 가 클 경우 슬라이딩모드 제어의 안정성을 보장할 수 있다.

3.2. 폐회로 극점배치 특성

식(15)의 제어기에서 선형 되먹임 제어부를 다음과 같이 u_L 이라 하면

$$u_L(t) = -(SB_o)^{-1}SA_o x(t) + (SB_o)^{-1}\phi\sigma(t) \quad (22)$$

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

$$\dot{\sigma}(t) = \phi\sigma(t) \quad (23)$$

따라서 슬라이딩 함수는 ϕ 에 따라 안정성과 수렴성이 결정된다.

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

$$S = [\lambda_1 \lambda_2 \quad \lambda_1 + \lambda_2] \quad (24)$$

식(9)와 (24)를 식(23)에 대입하고 그 결과를 정리하면 다음 관계를 얻는다.

$$\lambda_1 \lambda_2 \dot{x}_1 + (\lambda_1 + \lambda_2) \dot{x}_2 + \dot{x}_3 = -\phi \{ \lambda_1 \lambda_2 x_1 + (\lambda_1 + \lambda_2) x_2 + x_3 \} \quad (25)$$

식(25)를 상태변수의 정의를 적용하여 재정리하면

$$\lambda_1 \lambda_2 \dot{y} + (\lambda_1 + \lambda_2) \dot{y} + \dot{y} = -\phi \{ \lambda_1 \lambda_2 [ydt + (\lambda_1 + \lambda_2) y + \dot{y}] \} \quad (26)$$

따라서 폐회로의 동력학은 다음으로 주어진다.

$$(s + \phi)(s + \lambda_1)(s + \lambda_2) \frac{Y(s)}{s} = 0 \quad (27)$$

여기서 $Y(s)$ 는 $y(t)$ 의 라플라스 변환이다. 식(27)에서 슬라이딩제어의 선형제어부에 의해 공극의 폐회로의 극점은 슬라이딩 평면을 정의하는 행렬 S 와 상수 ϕ 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

이상에서 제시된 슬라이딩모드제어의 적용성 및 성능 검증을 위해 그림 2의 1-자유도 AMB계에 적용하였다. 계의 파라미터는 표 1[17]과 같다.

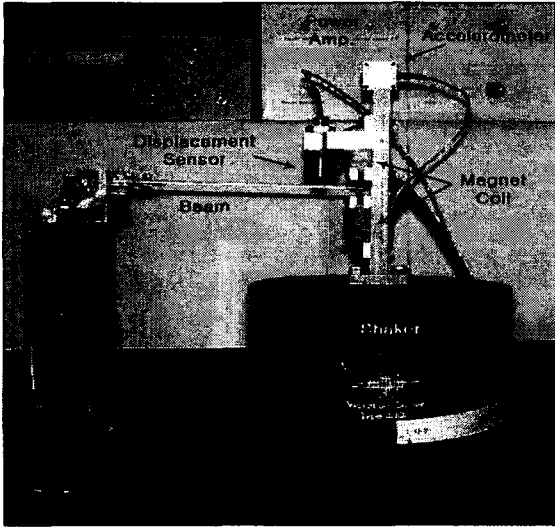


그림 2 실험장치 사진
Fig. 2 Photograph of test rig

표 1 시스템 파라미터
Table 1. System parameters

Parameter	Symbol	Value
Mass	m	0.154 [Kg]
Inertia	J	2.307×10^{-3} [Kgm^2]
Length	L	0.212 [m]
AMB position	x_a	0.205 [m]
Current Stiffness	K_i	2.722 [N/A]
Position Stiffness	K_y	2073.9[N/m]
Amp. Gain	K_a	0.5 [A/V]
Gap sensor gain		5mv/ μm

표 1의 계수를 이용하여 슬라이딩모드 제어를 설계하였다. 우선 슬라이딩 평면을 결정하는 식(24)의 행렬 S 에서 λ_1 과 λ_2 는 폐회로 극점의 감쇠비와 고유진동수가 각각 $\zeta=0.71$, $\omega_n=70Hz$ 이 되도록 선정하였으며, 상수 ϕ 는 $\phi=500$ 을 택하였다. 제어에서 샘플링 주파수는 하드웨어의 성능을 고려하여 8KHz로 결정하였으며, 설계된 슬라이딩모드 제어를 통해 계가 안정화 된 것을 확인하였다.

우선 외란관측기의 성능을 검증하기 위해 베이스가 40Hz 조화 운동하도록 가진하면서 슬라이딩모드 제어를 적용하였다. 그림 3에서 매끄러운 실선은 가속도계로 측정된 베이스 가속도이고 거친 실선은 외란관측기에서 추정된 총체적 외란이며, 크기가 작은 실선은 외란추정오차이다. 외란관측기에서 계수 $\mu=1200$ 으로 선정하였다. 그림 3에서와 같이 외란 관측오차의 표준편차는 측정된 외란의 표준편차의 21%로 나타났다.

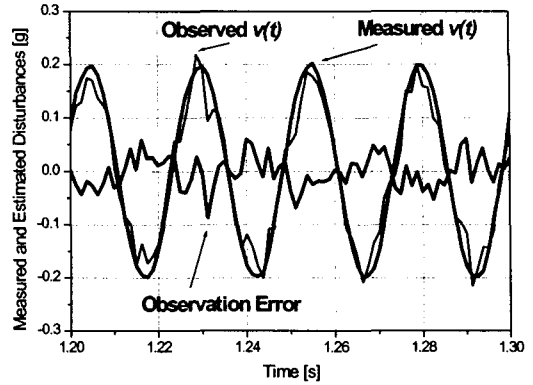


그림 3 베이스 40Hz 조화운동 시 외란의 측정치, 관측치 및 관측오차

Fig. 3 Measured disturbance, observed disturbance, and observation error under 40Hz harmonic base motion

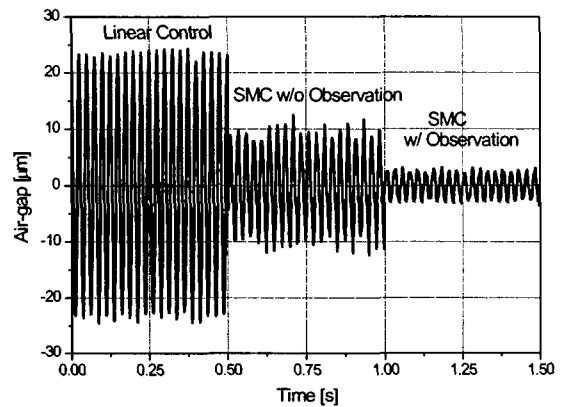


그림 4 베이스 40Hz 조화운동 시 공극응답

Fig. 4 Air-gap responses under 40Hz harmonic base motion

그림 4는 베이스가 40Hz의 조화운동할 때 세 가지 제어를 적용한 경우의 응답공극을 보인다. 첫 번째 부분은 식(22)와 같이 외란보상과 비선형 제어부를 제외한 순수한 선형제어만을 적용한 경우이며, 두 번째 부분은 외란보상 없이 일반적인 슬라이딩모드제어를 적용한 경우이고, 마지막 부분은 외란보상을 갖는 슬라이딩모드 제어를 적용한 경우이다. 선형제어는 일반적인 PID-제어기의 구조를 갖으며, 따라서 보의 자중에 의한 정상상태오차는 제거되었음을 알 수 있다. 각 부분에서의 응답공극의 표준편차는 각각 $\sigma=16.64, 6.85, 1.99 \mu m$ 로 선형제어보다는 일반적인 슬라이딩모드제어의 성능이 우수하며, 외란보상제어의 추가에 따라 더욱 개선됨을 알 수 있다. μ 를 증가시킬수록 관측오차가 감소함을 확인하였다. 슬라이딩모드제어에서 체터링이 발생되지 않도록 부호함수 대신 식(21)의 근사식을 적용하였다.

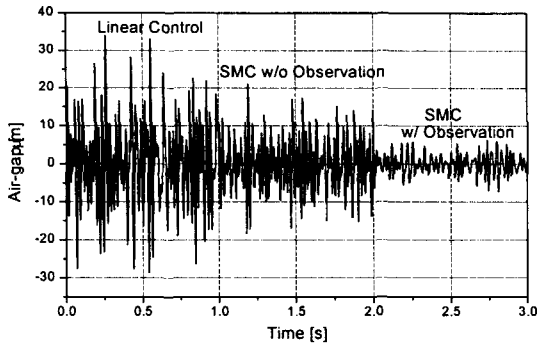


그림 5 베이스의 랜덤운동 시 공극응답
Fig. 5 Air-gap responses under random base motion

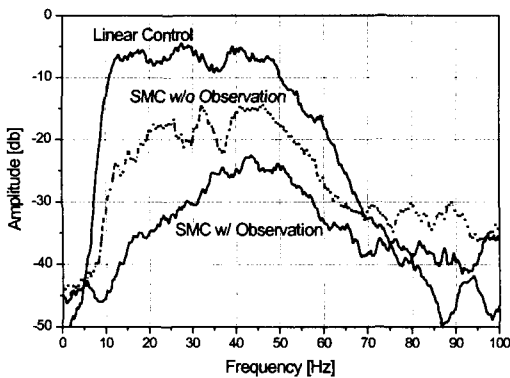


그림 6 베이스의 랜덤운동 시 공극응답의 스펙트럼
Fig. 6 Spectra of air-gap responses under random base motion

이론적으로 슬라이딩모드 제어의 응답은 앞에서 설정한 슬라이딩 평면의 특성에 비추어 외란응답을 완벽히 제거 해야 되나, 그림 4와 같이 잔여 응답이 남는 이유로는 적용한 제어기가 (1) 디지털 제어에 의한 스위칭 주파수의 한계, (2) 외란관측 오차, (3) 체터링을 제거하기 위해 사용한 부호함수를 근사화에 의한 오차 등의 요인을 들 수 있다.

AMB가 운반체에 장착되어 사용되는 경우 베이스 외란은 운반체의 운동에 해당하며, 지상에서 사용되는 차량에 적용하는 경우 이 외란은 저주파 영역에 대역폭을 갖는 랜덤 신호로 가정할 수 있다. 이를 모사하기 위해 주파수 범위 10~50Hz 대역폭을 갖는 랜덤 신호를 가진기에 제공하여 가진 하였다. 이 가진 상황 하에서 앞에서와 같이 선형제어, 일반적인 슬라이딩모드제어, 외란보상을 포함한 슬라이딩모드제어를 적용한 경우 응답은 그림 5와 같다. 그림 4에서와 같이 제어 성능은 선형제어보다는 일반적인 슬라이딩모드제어가, 일반적인 슬라이딩모드 제어보다는 외란보상을 포함한 슬라이딩제어의 성능이 더 우수함을 알 수 있다. 각각의 응답공극의 표준편차는 각각 $\sigma=11.7, 6.69, 2.57 \mu\text{m}$ 로 계산되었다. 그림 6은 그림 5 각 부분의 공극의 스펙트럼으로, 가진주파수 전체 범위에서 스펙트럼의 크기가 일반적인 슬라이

딩모드제어, 외란보상을 추가함에 따라 점차 작아짐을 알 수 있다.

이상의 결과를 통해 외란관측을 통한 외란보상 슬라이딩 모드제어가 외란 응답의 감소에 효과적임을 확인할 수 있다.

5. 결 론

능동자기베어링 설치면의 운동에 의한 공극의 변화는 제어성능을 저하시킨다. 본 연구에서는 베이스 운동의 가속도 외란에 의한 능동자기베어링의 공극응답을 최소화하기 위해 관측기 기반 슬라이딩모드제어를 제안하였다. 제안된 설계 방법에서 관측기의 동력학과 슬라이딩모드 동력학을 분리되며, 따라서 각각의 동력학을 독립적으로 설계할 수 있다. 또한 슬라이딩모드제어의 선형제어부 설계에서 폐회로 극점 배치를 용이하게 할 수 있는 방법을 제시하였다. 제안된 방법은 1-자유도 능동자기베어링에 적용하였으며, 실험 결과 제안된 제어가 외란응답의 감소에 효과적임이 입증되었다.

참 고 문 헌

- [1] M. O. T. Cole, P. S. Keogh, and C. R. Burrows, 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.
- [2] M. E. Kasada, J. Clements, A. L. Wicks, C. D. Hall, and R. G. Kirk, 2000, "Effect of Sinusoidal Base motion on a Magnetic Bearing", Proc. IEEE International Conference on Control Applications, pp.144~149.
- [3] Y. Suzuki, 1998, "Acceleration Feedforward Control for Active Magnetic Bearing Excited by Ground Motion", IEEE Proc. Control Theory Appl., vol.145, no.2, pp.113~118.
- [4] M. S. Kang and J. S. Jung, 2004, "Disturbance Compensation Control of An Active magnetic Bearing System by Multiple FXLMS Algorithm-Theory", J. of KSPE, vol. 21, No. 2, pp. 74~82.
- [5] M. S. Kang and J. S. Jung, 2004, "Disturbance Compensation Control of An Active magnetic Bearing System by Multiple FXLMS Algorithm-Experiment", J. of KSPE, vol. 21, No. 2, pp. 83~91.
- [6] D. K. Young, V. I. Utkin, and Ozguner, 1999, A control engineer's guide to sliding mode control", IEEE Transaction on Control Technology, vol. 7, no. 3.
- [7] C. Edwards and S. K. Spurgeon, 1998, Sliding Mode Control - Theory and Application, Taylor & Francis.
- [8] T. J. Yeh and Y. J. Chung, 2000, "Sliding control of magnetic bearing systems," Proc. of the American Control Conference, pp. 1622~1626.

[9] 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.

[10] I. M. M. Hassan and A. M. Mohamed, 2001, "Variable structure control of a magnetic levitation system", Proc. of the American Control Conference, pp.3725~3730.

[11] V. I. Utkin, J. Guldner, and J. Shi, 1999, Sliding mode control in electromechanical systems, New-York:Taylor & Francis.

[12] X. Shan and C. H. Menq, 2002, "Robust disturbance rejection for improved dynamic stiffness of a magnetic suspension stage," IEEE/ASME Trans. on Mechatronics, vol.7, no.3, pp.289-295.

[13] A. Kawamura, H. Itoh, and K. Sakamoto, 1994, "Chattering reduction of disturbance observer based sliding mode control," IEEE Trans. Ind. Application, vol. 30, pp.456-461.

[14] V. I. Utkin, 1992, Sliding modes in control and optimization, Springer-Verlag.

[15] A. E. Rundell, S. V. Drakunov, and R. A. Decarlo, 1996, "A sliding mode observer and controller for stabilization of rotational motion of a vertical shaft magnetic bearing," IEEE Trans. on Control Systems Technology, vol. 4, no. 5, pp.598-608.

[16] R. Zanasi, 1993, "Sliding mode using discontinuous control algorithm of integral type," Int. J. of Control, vol. 57, pp.1079-1099.

저 자 소 개



강민식 (姜珉植)

1957년 8월 27일생. 1980년 서울대학교 기계공학과 졸업. 1983년 한국과학기술원 생산공학과 졸업(공학석사). 1987년 한국과학기술원 기계공학과 졸업(공학박사). 1987년-1998년 국방과학연구소. 1998-현재 경원대학교 기계공학과 부교수.

Tel : 031-750-5524

Fax : 031-750-5273

E-mail : mskang@kyungwon.ac.kr