

전류와 자속의 궤환에 의한 자기베어링 시스템의 센서가 없는 변위 제어

論文

49D-7-1

Displacement-Sensorless Control of Magnetic Bearing System using Current and Magnetic Flux Feedback

李浚豪* · 姜玟守** · 鄭龍雲** · 李政奭** · 李基西***

(Jun-Ho Lee · Min-Soo Kang · Young-Woon Chung · Jung-Suk Lee · Key-Seo Lee)

Abstract - This paper deals with the displacement estimation of magnetically suspended simple 1 DOF(degree of freedom) system without the displacement sensor. Inherently electro-magnet for control has two natural feedback loops. One is the transfer function which represents the dependance of the amount of the magnetic flux on the gap displacements. The other is the transfer function expressing the properties that the back electromotive force is derived from the time derivative of the magnetic flux. Through these two feedback loops, information about the gap length can be represented by the magnetic flux and the coil current. This means that the gap length can be detected from these two states variables of the electromagnet without a displacements sensor(self-sensing). The displacement can be estimated with the magnetic flux subtracted by the coil current. In this paper we use a balance beam in order to deal with the displacement sensorless estimation of the magnetic bearing system. For the stable estimation of the gap displacements by using the method of self-sensing simple PD controller is used. We first show the mathematical model of the balance beam, and then we show the effectiveness of the current and flux feedback for making stable estimation of the gap displacements for the balance beam. Simulation results show the effectiveness of the current and flux feedback for good estimation of the displacement without using displacement sensor.

Key Words : Self-sensing, Sensorless, Magnetic bearings, Levitation, Magnetic flux, Coil current

1. 서 론

전자석을 이용한 자기베어링(magnetic bearing) 또는 자기부상(magnetic suspension) 시스템은 동작기(actuator)와 대상 목표(target)와의 간극(gap)을 측정하기 위해서 변위센서를 이용하고 있다. 변위센서에 의해서 측정된 간극신호는 대상 목표를 안정하게 부상시키기 위해서 설계된 궤환 제어기의 입력신호로 이용되며 이 입력신호에 의존해서 궤환 제어기는 적절한 신호를 출력한다.

이러한 원리는 자기베어링 시스템의 안정부상을 위해서는 변위센서에 의해서 측정된 간극신호가 반드시 필요하다는 것을 의미한다. 그러나 변위센서는 어느 정도의 크기를 갖고 있으며 또한 변위센서를 구동시키기 위한 증폭기를 필요로 한다. 이러한 물리적 크기에 대한 제약성은 힘의 작용점인 전자석의 자극부(pole face)에 변위센서를 직접 설치하는 것이 불가능하게 하는 공간의 한계성을 일으키며, 따라서 변위센서는 자극부에서 어느 정도 떨어진 위치에 설치되는 것

이 상례이다. 이러한 작용점과 검출점 사이의 불일치(non-collocation)는 검출점과 작용점 사이에 공진을 일으키게 하는 원인이 되기도 하며 대상목표에 대한 정밀한 위치제어의 어려움 등을 일으킨다. 따라서 만약 변위센서를 사용하지 않고 자기 베어링 시스템을 안정하게 부상시키는 것이 가능하다면 불일치 문제를 해결할 수 있으며 또한 고가격의 변위센서와 증폭기를 사용하지 않기 때문에 저렴한 가격으로 자기 베어링 시스템의 능동제어가 가능하고 많은 배선을 줄일 수 있기 때문에 자기 베어링 시스템을 좁은 공간에 설치 운영하는 것이 가능하다.

이를 위하여 Vischer등은 변위센서를 이용하지 않고 전자석 자신의 상태량을 이용하는 것만으로 간극의 변화를 추정하는 방법을 제시하였다. 즉 코일에 흐르는 전류와 인가전압과의 관계로부터 간극의 변화 속도를 추정하였다.[1][2] 또 Zlatnik등은 자극부의 자속을 검출하여 간극의 변화를 추정하는 방법을 제시하였다.[3] 그리고 Matsumura등은 전자석의 코일에 흐르는 전류만을 검출하여 상태관측기를 구성해서 간극의 속도를 추정하는 방법을 제시하였다.[4] 이 경우에는 상태관측기의 신뢰도를 확보하기 위하여 파라미터 동정(parameter identification)을 행해야하는 번거로움이 있다.

본 연구에서는 전자석의 전류와 자속을 궤환하는 방법을 이용하여 변위센서를 사용하지 않고 간극의 변화를 추정(estimation) 하는 방법을 제시하였다. 대상 목표로는 간단한 으며, 안정한 추정을 위해서 간단한 비례, 미분기를 사용하였다.

* 正 會 員 : Virginia 주립대 機械工學科 ROMAC
Postdoc. Fellow

** 正 會 員 : 光云大 制御計測工學科 博士課程

*** 正 會 員 : 光云大 制御計測工學科 正教授

接受日字 : 1999年 8月 6日

最終完了 : 2000年 6月 19日

2. 수학적 모델

전자석의 동작을 지배하는 기본관계식은 전자석의 코일 전압 e , 코일 전류 i 와 전자석 철심을 흐르는 총 자속의 시간변화에 의해서 발생하는 역기전력을 이용하여 아래 식과 같이 표현된다.

$$e = Ri + N\left(\frac{d\Phi_t}{dt}\right) \quad (1)$$

여기서, N 은 코일 권수, R 은 코일 저항을 표시한다. 총 자속 Φ_t 는 전자석과 목표 사이의 간극에서 발생하는 유효자속 Φ_g 와 누설자속 Φ_l 으로 표현된다.

$$\Phi_t = \Phi_g + \Phi_l \quad (2)$$

$$\Phi_g = \frac{\mu_0 A_g}{2g} Ni = P_g Ni \quad (3)$$

$$\Phi_l = P_l Ni \quad (4)$$

여기서

μ_0 : 진공중의 투자율 ($4\pi \times 10^{-7}$)

A_g : 전자석의 자극 단면적

g : 전자석과 목표 사이의 간극

투자율(permeability) P_g 는 간극 g 에 반비례하는 것으로 가정하며 누설자속 Φ_l 은 매우 작으므로 본 연구에서는 무시하기로 한다.

또한 전자석에서 발생하는 흡인력은 식(5)와 같이 유효자속 Φ_g 의 2승에 비례한다.

$$f = \frac{\Phi_g^2}{\mu_0 A_g} = \frac{\mu_0 N^2 A_g}{4} \frac{i^2}{g^2} \quad (5)$$

위의 식들을 기본으로 해서 평형 빔의 수학적 모델을 유도한다. 그림 1은 전자석으로 지지되는 평형 빔의 기본구조를 나타낸다. 이 그림에서 A1과 A2는 각각 전자석 동작기 1과 2, S1과 S2는 실제 빔의 위치를 측정하기 위한 센서 1과 2, i_1, i_2 는 전자석 동작기 1, 2의 코일에 흐르는 전류, e_1, e_2 는 전자석 동작기1, 2의 코일 전압을 나타낸다.

평형 빔에 사용되는 각 파라미터들의 값은 다음과 같다.

전자석 자극부의 단면적 A_g : $2.25e-5 [m^2]$

정상상태 간극 g_0 : $0.000381 [m]$

바이어스 전류 i_0 : $1[A]$

빔의 관성 모멘트 J : $0.094805 [Kg \cdot m^2]$

전자석 자극부의 중심으로부터

피봇(pivot)까지의 간극 L_a : $0.1412 [m]$

피봇으로부터 센서까지의 간극 L_s : $0.1143 [m]$

코일 턴 수 N : $140 [회]$

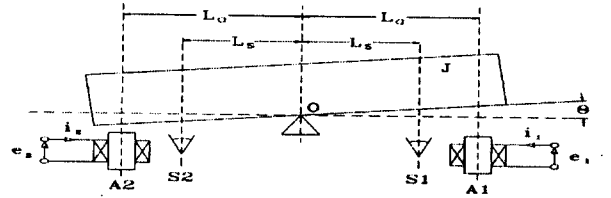


그림 1 전자석으로 지지되는 평형 빔의 기본구조

Fig. 1 Symmetric balance beam with magnetic bearings

저항 R : $0.7 [\Omega]$

바이어스 전압 e_0 : $0.7[V]$

평형 빔의 전자석 흡인력에 의한 운동 방정식과 전압 방정식은 다음과 같다.

$$J\ddot{\theta} = F_1 L_a - F_2 L_a \quad (6)$$

$$= \frac{\mu_0 N^2 A_g L_a}{4} \left(\frac{(i_0 + \delta i_1)^2}{(g_0 - L_a \theta)^2} - \frac{(i_0 + \delta i_2)^2}{(g_0 + L_a \theta)^2} \right)$$

$$E_j = R i_j + N \frac{d}{dt} (\delta \Phi_{s1} - \delta \Phi_{s2}), \quad (j=1, 2) \quad (7)$$

여기서

J : 빔의 관성 모멘트

F_1, F_2 : 전자석 1과 2 의 흡인력

g_0, i_0 : 공칭(nominal)간극과 바이어스 전류

$\delta i_j (j=1, 2)$: 전자석 1과 2 의 코일에 흐르는 미소 전류 변화분

식(6)을 Taylor 급수 전개법을 이용하여 전류의 미소 변화분과 간극의 미소 변화분에 대해서 선형화하고 식(7)을 각 물리량의 미소 변화분에 대해서 표현하면 다음의 관계식을 얻는다.

$$\ddot{\theta} = \frac{L_a}{J} (\delta f_1 - \delta f_2)$$

$$= \frac{1}{J} \frac{\mu_0 N^2 A_g L_a}{2} \frac{i_0}{g_0^2} (\delta i_1 - \delta i_2) + 2 \frac{1}{J} \frac{\mu_0 N^2 A_g L_a^2}{2} \frac{i_0^2}{g_0^3} \theta$$

$$= \frac{k_i}{J} (\delta i_1 - \delta i_2) + 2 \frac{k_\theta}{J} \theta \quad (8)$$

$$\delta e_j = R \delta i_j + N \frac{d}{dt} (\delta \Phi_{s1} - \delta \Phi_{s2}), \quad (j=1, 2)$$

$$= R \delta i_j + N \frac{d}{dt} \left(\frac{\mu_0 N A_g (\delta i_1 - \delta i_2)}{2g_0} + 2 \frac{\mu_0 A_g N i_0 L_a}{2g_0^2} \theta \right)$$

$$= R \delta i_j + N \frac{d}{dt} (P_{s0} N (\delta i_1 - \delta i_2) + 2 P_{s0} N \frac{i_0}{g_0} L_a \theta) \quad (9)$$

여기서

$$k_i = \frac{\mu_0 N^2 A_g i_0 L_a}{2g_0^2}, \quad k_\theta = -\frac{\mu_0 N^2 A_g i_0^2 L_a^2}{2g_0^3} : \text{선형화 계수}$$

k_i : 전자석 동작기 이득

k_g : 간극(gap)의 강성(stiffness)
 $\delta f_1, \delta f_2$: 전자석 1과 2의 흡인력의 미소 변화분
 θ : 빔의 각 변화량
 $\delta e_j (j=1,2)$: 바이어스 전압을 제외한 제어전압

k_i 는 (+)부호를 나타내고 있다. 이것이 의미하는 것은 전류의 증가 또는 감소가 빔을 평형 위치에 있도록 자기력을 증가 또는 감소시킨다는 것을 의미한다. k_g 는 (-)부호를 갖고 있다. 이것은 일반적인 스프링 특성(원 상태로 돌아가려는 특성)과 반대되는 특성으로서 전자석의 경우 목표가 전자석에 가까워질수록 목표를 끌어당기는 흡인력이 증가하는 특성을 나타낸다. 이것을 전자석의 부 강성(negative stiffness) 특성이라고 한다. (8)식을 정상 간극(nominal gap)의 투자율 $P_{g0} = \frac{\mu_0 A_g}{2g_0}$ 와 (9)식의 $N \frac{d}{dt}(\delta \Phi_{g1} - \delta \Phi_{g2})$ 를 이용하여 다시 표현하면 식(10)을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} J\ddot{\theta} &= L_a(\delta f_1 - \delta f_2) \\ &= L_a(P_{g0}N^2(\delta i_1 - \delta i_2) + 2P_{g0}N^2 \frac{i_0}{g_0} L_a\theta) \frac{i_0}{g_0} \quad (10) \\ &= L_aN(\delta \Phi_{g1} - \delta \Phi_{g2}) \frac{i_0}{g_0} \end{aligned}$$

식(10)에서 평형 빔에 작용하는 전자석의 흡인력 $\delta f_1 - \delta f_2$ 는 평형점에서의 미소 전류 변화분과 미소 각 변위로 된다.

3. 자기검지(Self-Sensing) 작용과 속도 계환

변위센서를 이용하지 않고 전자석 자신의 상태량을 검출하는 것만으로 간극의 변화를 추정하기 위하여 그림 2의 선형화 모델을 이용한다. 그림 2는 식(10)으로 표현되는 전자석의 선형화 모델을 이용하여 평형 빔의 동특성 운동(dynamic motion)을 블록 다이어그램으로 표현한 것이다. 이 그림에서 각모멘트 θ 의 변화에 의해서 자속 $\delta \Phi_{g1} - \delta \Phi_{g2}$ 와 코일 전류 $\delta i_1 - \delta i_2$ 가 영향을 받는 것을 알 수 있다. 어떠한 영향을 받는가를 명확히 하기 위해서 그림 2를 그림 3과 같이 정리한다. 식 (9)를 이용하여 전자석 자신의 상태량 중의 하나인 전류의 미소변화분에 대하여 정리하면 식(11)이 된다.

$$\begin{aligned} \delta i_1 - \delta i_2 &= \frac{1}{R} [(\delta e_1 - \delta e_2) - N \frac{d}{dt}(\Phi_{g1} - \Phi_{g2})] \\ &= \frac{1}{R} \times [(\delta e_1 - \delta e_2) - P_{g0}N^2s(\delta i_1 - \delta i_2) - 2P_{g0}N^2s \frac{i_0}{g_0} L_a\theta] \quad (11) \\ &= \frac{1}{R + P_{g0}N^2s} [(\delta e_1 - \delta e_2) - 2P_{g0}N^2 \frac{i_0}{g_0} L_a\theta] \\ &= \frac{1}{R(1+as)} [(\delta e_1 - \delta e_2) - 2P_{g0}N^2 \frac{i_0}{g_0} L_a\theta] \end{aligned}$$

여기서

s : Laplace 연산자

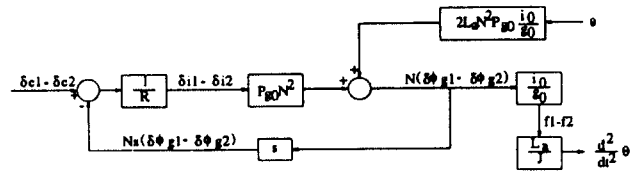


그림 2 전자석의 선형화 모델
 Fig. 2 Linearized model of electro-magnet

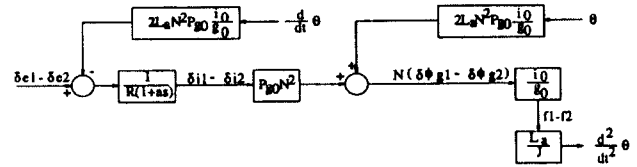


그림 3 변경된 전자석의 선형화 모델
 Fig. 3 Linearized model of modified electro-magnet

$$a = \frac{1}{R} P_{g0} N^2 : \text{코일의 시정수}$$

식(11)에서 알 수 있듯이 코일 전류 $\delta i_1 - \delta i_2$ 는 각변위 θ 의 각 속도 성분인 $\dot{\theta}$ 에 대한 정보를 포함하고 있다. 또한 그림 3에 의해서 간극 자속의 미소 변화분인 $\delta \Phi_{g1} - \delta \Phi_{g2}$ 는 각속도 $\dot{\theta}$ 와 각변위 θ 에 대한 정보를 포함하고 있는 것을 알 수 있다(self-sensing 작용). 이 자기검지 작용으로 전자석에 제어전압이 아닌 임의의 일정전압을 가해도 속도 계환 효과가 발생한다. 즉, 식(11)에서 코일 전압이 변화하지 않고 일정 전압을 유지할 때 각속도 성분 $\dot{\theta}$ 에 의해서 코일 전류 $\delta i_1 - \delta i_2$ 가 변화하고, 속도에 비례한 제어력 $\delta f_1 - \delta f_2$ 가 발생한다. 그림 3의 오른쪽의 계환루프는 정계환으로 구성되어 있다. 이것은 일정 전압을 가했을 경우 전자석의 일반적인 특성인 부 강성(negative stiffness) 특성과는 일치하지 않는, 즉 불안정한 자기흡인력이 존재하고 있음을 의미한다. 위에서 언급했듯이 전류 $\delta i_1 - \delta i_2$ 는 각속도 $\dot{\theta}$ 에 관한 정보를 포함하고 있지만 각변위 θ 에 관한 정보는 포함하고 있지 않다. 따라서 전류 $\delta i_1 - \delta i_2$ 를 이용해서 각속도에 관한 계환을 구성하는 것은 가능하지만 각변위에 관한 계환을 구성하는 것은 불가능하다. 이것이 의미하는 것은 코일 전류 $\delta i_1 - \delta i_2$ 를 검출해서 계환을 구성하는 것만으로는 전자석이 갖는 부 스프링(negative spring) 특성을 보상하는 것이 불가능하다는 것을 뜻한다.

4. 전류 계환

그림 3에서 코일 전압 $\delta e_1 - \delta e_2$ 와 코일 전류 $\delta i_1 - \delta i_2$ 로부터 각속도 $\dot{\theta}$ 를 추정하는 것이 가능하다.

$$\delta i_1 - \delta i_2 = \frac{1}{R(1+as)} [(\delta e_1 - \delta e_2) - 2L_a N^2 P_{g0} \frac{i_0}{g_0} \dot{\theta}] \quad (12)$$

식 (12)에서 각속도 θ 에 관하여 정리하면 식 (13)과 같이 된다.

$$\theta = \frac{(\delta e_1 - \delta e_2) - R(1 + as)(\delta i_1 - \delta i_2)}{2L_a N^2 P_{g0} \frac{i_0}{g_0}} \quad (13)$$

식(13)을 이용하여 각속도 제환을 구성한다는 것의 의미는 검출한 전류신호에 어떠한 조작을 가해서 코일 전압에 제환하는 것과 같은 의미를 갖는다. 이와 같이 코일 전류를 검출해서 적절한 제어를 이용하면 속도 제환의 효과를 증대시키는 것이 가능하지만 코일 전류에는 각변위에 대한 정보가 포함되어 있지 않으므로, 각변위에 대한 제환을 구성하는 것은 불가능하다. 따라서 전류 제환만으로는 전자석이 갖는 부 강성 특성을 보상하는 것은 불가능하다.

5. 전류와 자속에 의한 변위 추정

자속 신호(flux signal)는 식(11)에서와 같이 각변위에 대한 정보를 포함하고 있으므로, 각변위 제환을 구성하는 것이 가능하다. 부 강성 특성을 보상하기 위하여 코일 전류만이 아니고 전자석 자극부의 자속을 검출해서 제어에 이용한다. 그림 3에서 알 수 있듯이 코일 전류 $\delta i_1 - \delta i_2$ 와 간극의 유효 자속 $\delta \Phi_{g1} - \delta \Phi_{g2}$ 로부터 각변위 θ 를 추정하는 것이 가능하다. 즉 식(14)와 같이 된다.

$$N(\delta \Phi_{g1} - \delta \Phi_{g2}) = 2L_a N^2 P_{g0} \frac{i_0}{g_0} \theta + P_{g0} N^2 (\delta i_1 - \delta i_2) \quad (14)$$

식(14)부터 각변위 θ 에 관한 관계식을 유도하면 식(15)가 된다.

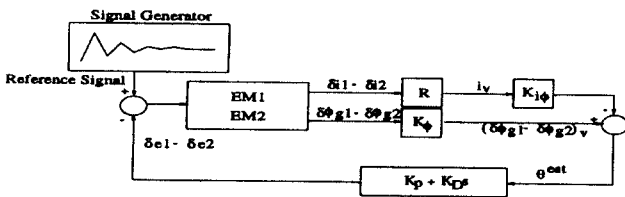


그림 4 전류와 자속제환에 관한 블록 다이어그램
Fig. 4 Block diagram of the current and flux feedback

$$\theta = \frac{g_0}{2L_a N^2 P_{g0} i_0} N [(\delta \Phi_{g1} - \delta \Phi_{g2}) - P_{g0} N (\delta i_1 - \delta i_2)] \quad (15)$$

$$= \frac{N(\delta \Phi_{g1} - \delta \Phi_{g2}) - P_{g0} N^2 (\delta i_1 - \delta i_2)}{2L_a N^2 P_{g0} \frac{i_0}{g_0}}$$

이 각변위의 추정치에 임의의 조작을 가해서 코일 전압에 제환하면 변위에 관한 제환 루프를 구성하는 것이 가능하다.

본 논문에서는 각변위의 적절한 추정(estimation)을 위해

서 간단한 PD 보상기를 이용한다. 그림 4는 전류와 자속에 관한 블록 다이어그램을 나타낸다. 그림 4에서 전류(i)의 아래첨자 v 는 각 물리량의 전압신호를, 각변위(θ)의 위첨자 est는 추정값(estimated value)을, R 은 전류를 전압으로 변환하기 위한 저항, $K_{i\phi}$ 는 자속검출 이득, $K_{i\theta}$ 는 전류를 자속으로 변환하는 이득을 각각 나타낸다. 또한 좌측의 신호발생기는 임의의 각변위 신호를 발생시키기 위하여 이용된다. 그림4에서 알 수 있듯이 각변위의 추정치 θ^{est} 의 제환이 갖는 의미는 PD보상기에 의해서 전류 $\delta i_1 - \delta i_2$ 에 대해서는 제환, 자속 $\delta \Phi_{g1} - \delta \Phi_{g2}$ 에 대해서는 부제환을 구성하는 것을 의미한다. 즉, 변위의 추정치 θ^{est} 가 PD 보상기에 의해서 부제환 되기 때문에 전자석이 본질적으로 갖고있는 부 강성 특성을 보상하는 것이 가능하다는 의미를 갖는다.

6. 전류와 자속과의 관계

식(3)에서 알 수 있듯이 자속 Φ_g 는 전류 i 에 비례하고 간극 g 에 반비례한다. 따라서 간극은 전류신호 i^v 와 자속신호 Φ_g^v 의 비에 비례하게 된다.

$$g \propto \frac{i^v}{\Phi_g^v} \quad (16)$$

식(16)에서 알 수 있듯이 전류와 자속의 비로부터 간극의 크기를 추정하는 것이 가능하다. 식(16)을 이용하면 미소변화분 θ 는 다음 식으로 표현된다.

$$\theta \propto (\delta \Phi_{g1} - \delta \Phi_{g2})^v - K_{i\theta} (\delta i_1 - \delta i_2)^v \quad (17)$$

$$K_{i\theta} = \frac{\Phi_{g0}^v}{i_0^v}$$

여기서 $K_{i\theta}$ 는 정상성분의 크기에 의존하는 값이다.

7. 시뮬레이션

시뮬레이션의 목적은 전자석으로부터 검출 가능한 전류와 자속신호를 제환하여 추정한 각변위 추정 값이 신호발생기의 출력인 어떤 임의의 각변위 신호(기준신호)를 잘 추종하는가를 보이는 것이다. 그림 5는 신호발생기의 출력신호이며 이 신호가 각변위 추정기의 출력인 각변위 추정 값과 비교되는 기준신호로 사용된다.

7.1 자기검지(Self-sensing) 작용

전자석이 본질적으로 갖고있는 자기 검지 작용을 검토하기 위하여 전자석의 코일에 일정전압을 인가한다. 그림 6, 7, 8은 시뮬레이션 결과를 나타낸다.

그림 6, 7, 8에서 알 수 있듯이 전자석에 일정전압만을 인

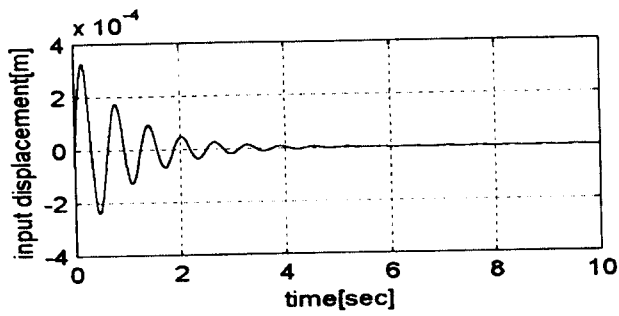


그림 5 간극 추정기의 기준신호
Fig. 5 Reference signal for the gap estimator

가했을 지라도 전자석 코일전류와 간극자속(gap flux)은 각 변위의 변화에 대응해서 변화하고 있는 것을 알 수 있다. 이것은 전자석이 본질적으로 자기 검지 작용을 하고 있다는 것을 의미한다.

7.2 전류 제한

그림 9, 10, 11, 12 는 각각 기준신호, 전류 제한에 의해서 추정된 각변위, 코일전류, 재조정된 각변위 신호를 나타낸다.

그림 9, 12는 같은 y 축 눈금에 의한 기준신호와 추정된 각변위 신호를 나타낸다. 이들 그림은 전류만의 제한에 의

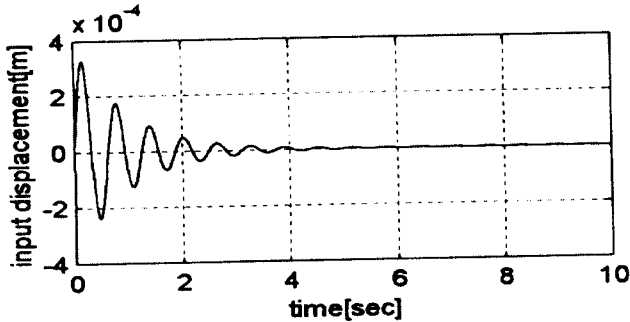


그림 6 기준 신호
Fig. 6 Reference signal

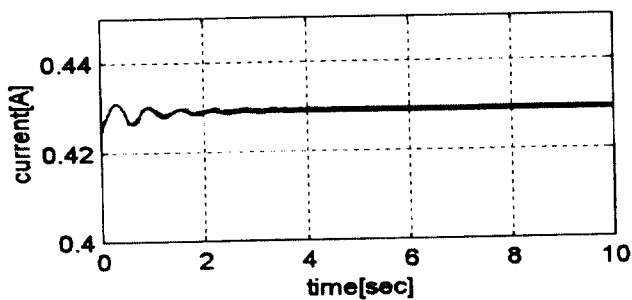


그림 7 일정 전압 인가시의 전류 신호
Fig. 7 Current signal under constant voltage

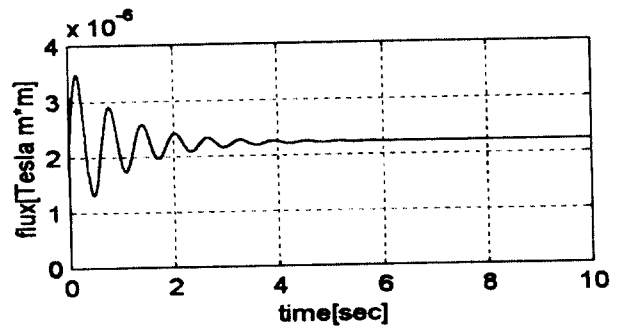


그림 8 일정 전압 인가시의 자속 신호
Fig. 8 Flux signal under constant voltage

한 각변위의 추정이 정확하게 이루어지고 있지 않음을 보여 준다. 이것은 앞에서 언급했듯이 전류신호에는 각변위에 대한 정보를 포함하고 있지 않고 각속도에 관한 정보만이 포함하고 있기 때문이다.

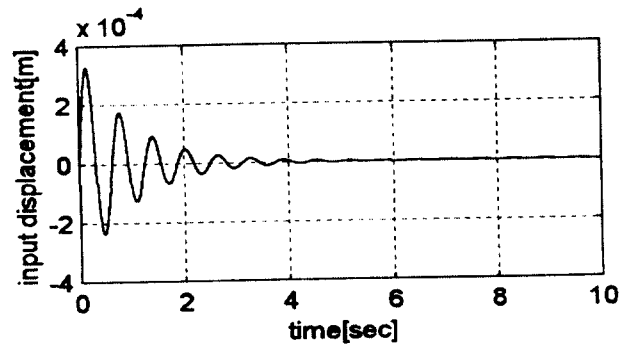


그림 9 기준 신호
Fig. 9 Reference signal

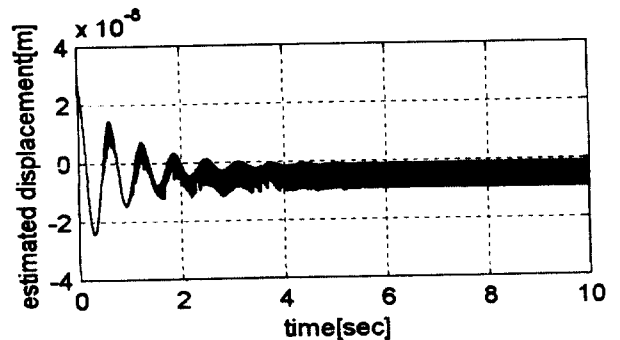


그림 10 전류 제한에 의해 추정된 각변위
Fig. 10 Estimated angular displacements by current feedback

7.3 전류와 자속의 제한

그림 13, 14, 15, 16은 전류와 자속을 제한했을 경우 각

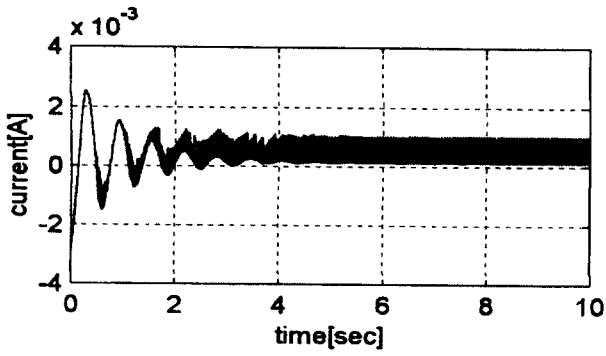


그림 11 코일 전류
Fig. 11 Current signal of coil

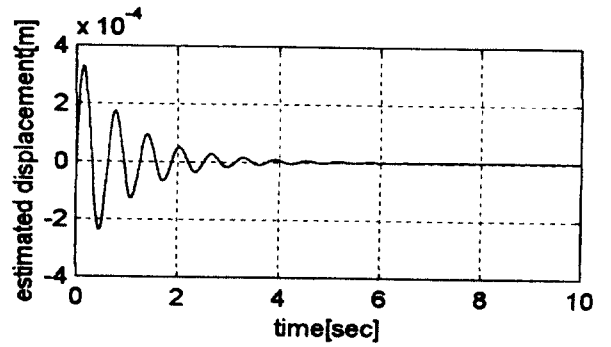


그림 14 추정된 각 변위
Fig. 14 Estimated angular displacements

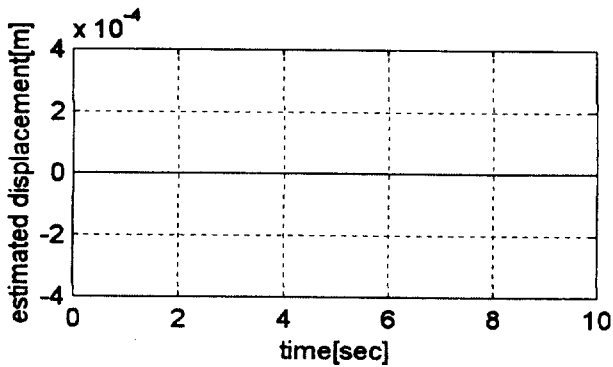


그림 12 전류 제환에 의해 조정된 추정 각변위 신호
Fig. 12 Re-scaled estimated angular displacements by current feedback

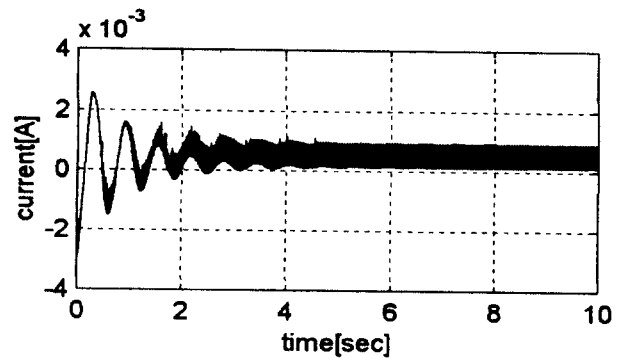


그림 15 전류 신호
Fig. 15 Current signal

물리량의 신호를 보여준다. 본 논문의 시뮬레이션에서는 자속신호의 제환을 위해서 홀(Hall) 센서를 사용하는 것으로 가정한다.

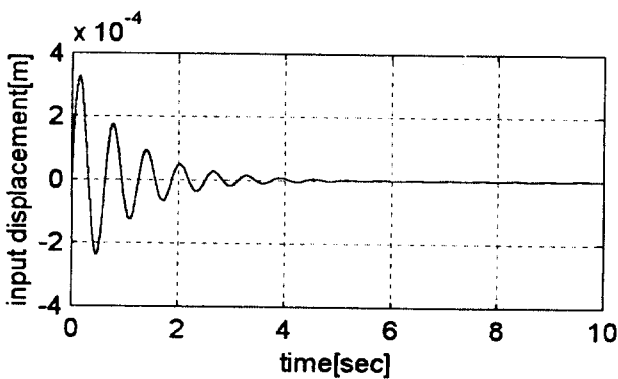


그림 13 기준 신호
Fig. 13 Reference signal

그림 14는 전류와 자속 제환에 의한 각변위 추정값을 나타낸다. 이 그림에서 알 수 있듯이 추정된 각변위의 값이 기준신호를 잘 추정하고 있는 것을 알 수 있다. 이것은 각

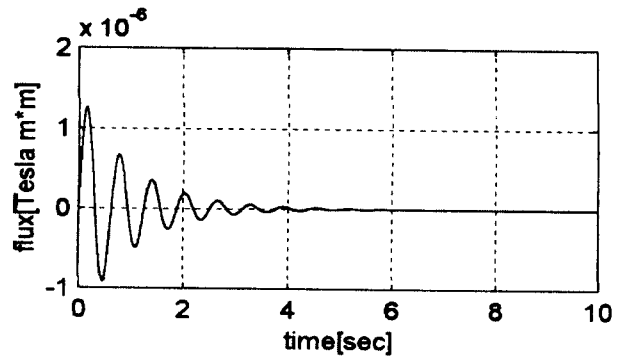


그림 16 자속 신호
Fig. 16 Flux signal

변위의 정보를 갖고있는 그림16과 같은 자속신호의 제환에 의한 것이다.

8. 결 론

본 논문에서는 변위센서를 이용하지 않고 전자석이 본질적으로 갖고있는 자기검지 작용을 이용해서 간극(gap)의 변화를 추정하는 추정기(estimator)를 간단한 PD 제어를 통

하여 설계했다. 전자석에 일정전압을 인가하고 어떤 임의의 신호에 의해서 간극을 변화시켰을 경우 전자석의 코일전류와 간극의 자속신호는 간극의 변화에 의존하는 것을 보였다. 전류 궤환에 의한 간극 변화의 추정(estimation)은 전류 신호가 간극의 변화에 관한 정보를 갖고 있지 않으므로 정확히 추정 할 수 없음을 보였으며 이와 같은 문제점은 전류와 자속의 궤환에 의해서 개선할 수 있음을 보였다.

앞으로 수행되어야 할 연구과제로서는 본 연구를 기초로 한 외란(disturbance)과 시스템의 불확실성(structured uncertainty, unstructured uncertainty)을 고려하는 자기검지 체재를 구성하는 것이며 또한 자속을 측정하기 위해서 사용된다고 가정한 홀 효과(hall-effect) 센서를 제거하고 자속을 추정하기 위한 추정기를 설계하는 것이다.

감사의 글

이 연구는 1999년도 광운대학교 학내학술연구비에 의하여 이루어졌음.

참 고 문 헌

- [1] Vischer, D. and Bleuler, H., "A New Approach to Sensorless and Voltage Controlled AMBs Based on Network Theory Concepts", Proc. of the Second Int. Sym. on Magnetic Bearings, pp. 301-306, July 1990.
- [2] Y. Okada, H. Hashitani, H. Zhang, and J. Tani, "Electromagnets as velocity sensors and vibration control actuators", Electromagnetic Forces and Application, pp. 171-174, 1992, Elsevier Science Publisher.
- [3] Zlatnik, D. and Traxler, A., "Cost-Effective Implementation of Active Magnetic Bearings", Proc. of the Second Int. Sym. on Magnetic Bearings, pp. 229-235, July 1990
- [4] F. Matsumura, N. Echigo, T. Namerikawa, "A study on a Magnetic Levitation System Design Based on Position Observer", 日本電氣學會 Linear Drive 研究會資料, LD-95-101, pp. 41- 50, 1995.
- [5] S. Ueno, J. H. Lee, P. E. Allaire, Y. Okada, "Sliding Mode of , Control of Magnetic Bearings: Compensation Sensed and Self Sensing Performance" Conference on The American Society of Mechanical Engineering(ASME), Indianapolis, Indiana, June 7- June 10, 1999.

저 자 소 개

이 준 호 (李 浚 豪)

1964년 7월 3일생. 1987년 광운대 공대 전기공학과 졸업. 1989년 광운대 전기공학과 대학원 졸업(석사). 광운대 전기공학과 대학원 박사과정 수료. 1998년 일본 나가자와 국립대학교 전기 및 컴퓨터 공학과 졸업(공학박) 1998년-현재 Univ. of Virginia주립대 기계공학과 ROMAC. Postdoc. Fellow



강 민 수 (姜 玟 守)

1971년 3월 25일생. 1993년 광운대 공대 제어계측공학과 졸업. 1995년 광운대 산업정보 대학원 졸업 제어계측공학과(석사). 현재 광운대 대학원 제어계측공학과 박사과정

Tel : 02-940-5154, Fax : 02-911-3930
E-mail: failsafe@explore.kwangwoon.ac.kr



정 용 운 (鄭 龍 雲)

1974년 1월 22일생. 1996년 광운대 공대 제어계측공학과 졸업. 1998년 광운대 대학원 졸업 제어계측공학과(석사) 2000년 광운대 대학원 제어계측공학과 박사수료 현재 (주)인프로 연구원

Tel : 02-597-4343, Fax : 02-597-4340
E-mail : iwsaac@dreamwiz.com



이 정 석 (李 政 奭)

1963년 6월 10일생. 1985년 광운대 공대 전기공학과 졸업. 1990년 광운대 전기공학과 대학원 졸업(석사). 1990-1997년 국방과학연구소 선임연구원 1999년 광운대 대학원 제어계측공학과 박사수료

Tel : 02-940-5154, Fax : 02-911-3930
E-mail: jslee97@explore.kwangwoon.ac.kr



이 기 서 (李 基 西)

1951년 1월 18일생. 1977년 연세대 공대 전기공학과 졸업. 1979년 연세대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1986년 연세대 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1988-1989년 Yale Univ. 교환교수 1981년-현재 광운대학교 제어계측공학과 정교수

Tel : 02-940-5154, Fax : 02-911-3930
E-mail: keyslee@daisy.kwangwoon.ac.kr