

이동 차량 탑재용 전자기 베어링 시스템 설계

Design of Active Magnetic Bearing System for Moving Vehicles

김 하 용† · 심 현 식* · 이 중 원** · 강 태 하***

Ha-Yong Kim, Hyun-Sik Sim, Chong-Won Lee and Tae-Ha Kang

(2004년 12월 29일 접수 : 2005년 2월 18일 심사완료)

Key Words : Active Magnetic Bearing(전자기 베어링), Base Motion(베이스운동), Acceleration Feed-forward Controller(가속도 피드 포워드)

ABSTRACT

The active magnetic bearing (AMB) systems mounted in moving vehicles are exposed to the disturbances due to the base motion, often leading to malfunction or damage as well as inaccurate positioning of the systems. Thus, in the controller design of such AMB systems, robustness to base disturbances becomes an essential requirement. In this study, effective control schemes are proposed for the homo-polar AMB system, which uses permanent magnets for generation of bias magnetic flux, when it is subject to base motion, and its control performance is experimentally evaluated. The base motion of AMB system is modeled as the dynamic disturbances in the gravity and base excitation forces. To effectively compensate for the disturbances, the angle feed-forward controller based on the inverse dynamic model and the acceleration feed-forward controller based on the normalized filtered-X LMS algorithm are proposed. The performance test of the prototype AMB system is carried out, when the system is mounted on rate table. The experimental results show that the performance of the proposed controllers for the AMB system is satisfactory in compensating for the disturbances due to the base motion.

1. 서 론

전자기 베어링은 전자기력을 이용한 비접촉 지지를 기본 개념으로 마찰과 마멸의 감소, 소음 및 진동 특성향상으로 고속 회전 기계와 고정밀 구동 장치에 적용되어왔다. 현재 적용 분야가 확장되면서 기존에 선반 등의 공작기계나 지반이 고정되어 있는 회전 기계 등에만 사용되던 전자기 베어링은 항공기, 선박, 자동

차 등 이동중인 차량이나 인공위성, 휴대용 전투장비 등에까지 영역을 확장하였다. 이러한 적용은 전자기 베어링의 전원 공급의 한계로 인한 전력소모량 제한과 축의 고정밀 구동을 위한 베이스의 움직임 등 외란에 대한 고려를 피할 수 없게 되었다.

전자기 베어링에서 점차 고정밀성을 요구함에 따라 외란의 영향이 더욱 부각되고, 이의 영향을 줄이기 위한 연구가 진행되어 왔다. 외부 외란에 관련하여 운행중인 차량에 전자기 베어링을 적용하여 귀환 제어기와 H_{∞} , 노치 필터 귀환 제어를 적용하여 성능을 비교하였고,^(1,2) 베이스 가진에 대한 외란을 주기적 외란으로 가정하여 귀환 제어기의 이득값 변화에 따른 특성과 가속도 피드 포워드 제어 기법을 적용하였다.^(3,4)

불균형력(unbalance)이나 런아웃(runout) 등 시스템

† 책임저자 : 정회원, 삼성종합기술원 HDD program팀
E-mail : hayongtk.kim@samsung.com
Tel : (031) 280-8229, Fax : (031) 280-6955

* 정회원, 삼성전자 메카트로닉스 센터

** 정회원, 한국과학기술원 기계공학과

*** 국방과학연구원

템 내부적인 외란을 보상하기 위한 연구로 전자기 베어링의 런아웃의 규명과 이로 인한 주기적인 외란에 대한 정밀 제어 시스템의 구현을 위해 LMS 알고리즘을 제안하였다.”

이 논문에서는 차량에 적용하기 위한 전자기 베어링으로써 전력 소모를 최소화한 영구 자석(permanent magnet)을 이용한 호모 폴(homo-pole)형 전자기 베어링을 설계하였으며, 베이스 움직임에 따른 외란을 제어하기 위하여 각도 피드 포워드와 normalized filtered-X LMS 알고리즘을 이용한 가속도 피드포워드 기법을 제안하고, 실험을 통하여 이의 특성을 검증하였다.

2. 전자기 베어링 설계

설계된 전자기 베어링은 Fig.1과 같이 한 쌍의 반경 방향 베어링과 중심에 축방향 베어링을 가지고 있다. 반경방향 베어링은 한 베어링 면에 4개의 폴을 갖는 호모 폴(homo-pole) 전자기 베어링으로, 헤테로 폴(hetero-pole)전자기 베어링에 비해 베어링 면에서 극성 변화가 적어 상대적으로 작은 히스테리시스(hysteresis) 손실을 보이며, 바이어스 자속을 대체하

기 위한 영구 자석의 사용이 용이하여 전력 소모를 크게 줄일 수 있다는 장점을 지니고 있다. 또한 여기서는 회전축의 축 방향으로의 움직임을 지지하기 위하여 반경방향 전자기 베어링에 추가로 축방향 전자기 베어링을 혼합하여 사용하였다. 영구 자석에 의한 바이어스 자속은 Fig.2에 나타난 것과 같이 반경 방향 베어링, 축과 축 방향 베어링을 따라 흐르는 폐회로를 이루고 있다. 바이어스 자속을 기본으로 반경 방향 제어 자속과 축 방향 제어 자속은 Fig.3에 나타나 있다. 반경 방향 제어 자속은 반경 방향 베어링 면에서만 흐르게 되며, 축 방향 제어 자속은 축방향 베어링과 대상 디스크를 통해 흐른다. 영구 자석 자속 흐름에 따른 공극에서의 바이어스 자속은 다음과 같다.

$$\phi_m = B_g A_g = \frac{1}{\alpha} B_m A_m = \frac{H_m l_m}{R_b} \quad (1)$$

여기서, B_g 는 반경방향 공극에서의 자속 밀도, A_g 는 폴 단면적, B_m 은 영구 자석의 자속 밀도, A_m 은 영구 자석의 단면적, l_m 은 영구 자석의 두께, H_m 은 항자력, α 는 누설 계수이다. 바이어스 자속에 관련된 자기 회로 모형에서의 자기 저항 값은 다음과 같다.

$$R_b = \frac{2g_{mr}}{\mu_o A_r} = \frac{2g_{mx}}{\mu_o A_x} \quad (2)$$

여기서, $\mu_o (= 4\pi \times 10^{-7} \text{H/m})$ 는 공극에서의 투자율, g_{mr} 과 g_{mx} 는 반경 방향과 축 방향 자속경로에 따른 등가 공극, A_r 과 A_x 는 각각 반경 방향과 축 방향의 폴의 단면적이다. Fig.3의 자속 경로로부터 전자석에

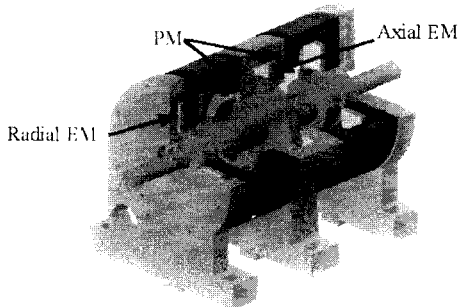


Fig. 1 Perspective view of AMB

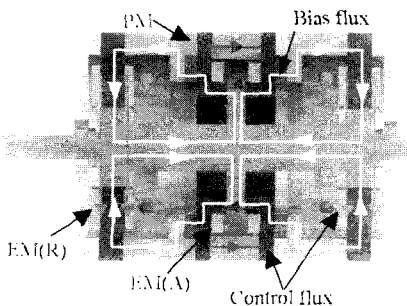


Fig.2 Bias flux path of homo-polar AMB

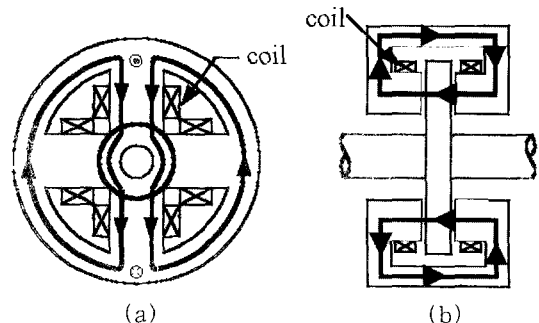


Fig. 3 Control flux path of (a) radial and (b) axial electromagnet

의한 반경 방향과 축방향 제어 자속은 다음과 같이 나타낸다.

$$\phi_{cr} = \frac{N_r i_r}{R_{cr}}, \quad \phi_{cx} = \frac{N_x i_x}{R_{cx}} \quad (3)$$

여기서, 자기회로 모형에서의 반경 방향과 축 방향에 따른 자기저항 값은 각각 다음과 같다.

$$R_{cr} = \frac{2g_{cr}}{\mu_0 A_r}, \quad R_{cx} = \frac{2g_{cx}}{\mu_0 A_x} \quad (4)$$

g_{cr} 과 g_{cx} 은 반경 방향과 축방향 제어 자속 경로에서의 등가 공극이다. 공극에서의 영구 자석에 의한 바이어스 자속과 반경 방향, 축 방향 제어 자속의 관계로부터 축에 작용하는 반경 방향 힘과 축 방향 힘을 구할 수 있다.

$$F(r, i_r) = \frac{1}{\mu_0 A_r} [(\phi_m + \phi_{cr})_I^2 - (\phi_m - \phi_{cr})_{II}^2] \quad (5)$$

$$F(x, i_x) = \frac{1}{\mu_0 A_x} [(\phi_m + \phi_{cx})_I^2 - (\phi_m - \phi_{cx})_{II}^2] \quad (6)$$

여기서,

$$g_{mrl} = g_r - r, \quad g_{mrll} = g_r + r$$

$$g_{mxl} = g_x - x, \quad g_{mxll} = g_x + x$$

하첨자 *I* 과 *II* 는 마주보는 한쌍의 전자석을 뜻한다. 반경 방향 변위, r 과 축 방향 변위 x , 그리고 제어 전류 i_r , i_x 가 정상 상태에서 공극 g_r 과 g_x 에 비해 매우 작다면, 테일러 시리즈를 이용하여 선형화 가능하다.

$$F(r, i_r) \approx K_r r + K_{ir} i_r \quad (7)$$

$$F(x, i_x) \approx K_x x + K_{ix} i_x \quad (8)$$

선형화 식으로부터 각각의 변위 강성(position stiffness)과 전류 강성(current stiffness)은 다음과 같다.

$$K_r = \frac{4\mu_0 A_r (H_m l_m)^2}{(g_{mr} + \gamma g_{mx})^3}, \quad K_x = \frac{4\mu_0 A_x (H_m l_m)^2}{(\gamma' g_{mr} + g_{mx})^3}$$

$$K_{ir} = \frac{2H_m l_m \mu_0 A_r N_r}{g_{cr} (g_{mr} + \gamma g_{mx})}, \quad K_{ix} = \frac{2H_m l_m \mu_0 A_x N_x}{g_{cx} (\gamma' g_{mr} + g_{mx})},$$

$$r = y, z, \quad \gamma = \frac{A_r}{A_x}, \quad \gamma' = \frac{1}{\gamma}$$

식 (7), (8)을 전체 전자기 베어링 계의 베어링 고정 좌표계를 이용하여 운동 방정식으로 나타낼 수 있다.

$$M\ddot{\mathbf{q}} + K\mathbf{q} = \mathbf{f}_c$$

$$\mathbf{q} = \{x \quad y_1 \quad y_2 \quad z_1 \quad z_2\}^T \quad (9)$$

여기서, \mathbf{f}_c 는 제어력 벡터, \mathbf{q} 는 축의 변위 벡터, \mathbf{M} 은 질량 행렬이고, \mathbf{K} 는 강성 행렬이다.

3. 베이스 운동의 모형화

전자기 베어링 시스템의 베이스 움직임에 대한 외란 성분은 중력에 의한 외란과 베이스 가진력으로 구분할 수 있다. 해석의 편의성을 위하여 Fig. 4에서와 같이 Y, Z 는 축에 관한 절대 좌표계, y, z 는 상대 좌표계를 나타낸다.

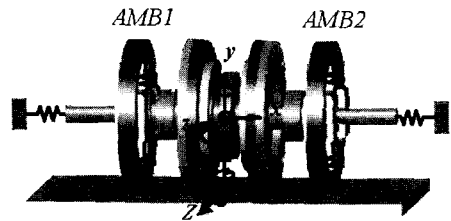


Fig. 4 AMB system subject to base excitation

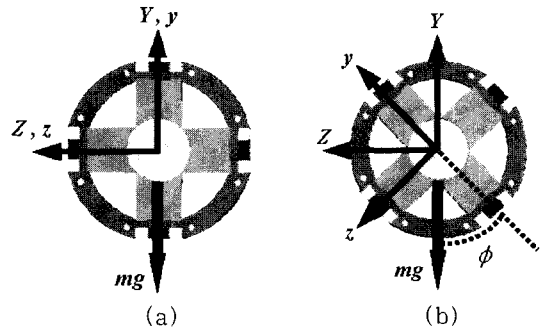


Fig. 5 Gravitational direction (a) without and (b) with base motion

일반적으로 축 자중이나 센서 오프셋들에 의한 정적 외란을 보상하기 위하여 제어 전류에 오프셋을 추가하여 축 중심이 항상 베어링 중심과 일치하도록 한다. Fig. 5와 같이 차량에 장착된 전자기 베어링의 경우 베이스의 위치에 따라 베이스에 고정된 자중을 보상해 주어야 하는 폴의 위치가 피치 각(ϕ)만큼 변화된다. 이를 보상하기 위하여 전자기 베어링의 회전축을 중심으로 베이스가 회전한 각도(ϕ)를 측정하고, 베이스에 대한 중력의 회전 각도를 이용한 각도 피드포워드 제어를 제안하였다.

$$M\ddot{q} + Kq = f_c + f_g \quad (10)$$

여기서,

$$f_g = mg \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{2}\cos\phi & -\frac{1}{2}\cos\phi & \frac{1}{2}\sin\phi & \frac{1}{2}\sin\phi \end{bmatrix}^T \quad (11)$$

m 은 축의 질량이다. 또한, 전자기 베어링을 지지하고 있는 베이스가 가진되는 경우, 이때의 시스템은 Fig. 4와 같이 모형화 된다. 식 (9)와 위에서 정의한 좌표계를 이용하여 축의 운동방정식을 축 중심에 대해서 표현하면 다음과 같다. 이 때, 축과 베이스 사이의 거리는 매우 작다고 가정한다.

$$M(\ddot{q} + \ddot{Q}) + Kq = f_c + f_g$$

$$Q = \{X \ Y_1 \ Y_2 \ Z_1 \ Z_2\}^T \quad (12)$$

여기서, Q 는 절대 좌표계에서의 회전축의 변위 벡터이다. 전자기 베어링과 같이 고정자로부터 축의 상대 움직임을 측정하여 제어하는 시스템에서는 축의 절대 변위보다 베이스에 고정된 고정자를 기준으로 한 상대 변위를 제어하는 편이 용이하며, 본 논문에서와 같이 베이스 움직임에 대한 축의 안정화를 목적으로 하는 시스템에서는 고정자에 대한 축의 상대 변위를 제어하는 것이 중요하다. 따라서, 식 (12)를 상대좌표로 다시 표현하면 다음과 같다.

$$M\ddot{q} + Kq = f_c + f_g + f_b \quad (13)$$

여기서, f_b 는 피치 운동을 제외한 5자유도의 외력 벡터이다.

$$f_b = -M\ddot{Q} \quad (14)$$

5 자유도의 베이스 움직임을 제어하기 위하여 식 (12)를 보면 베이스 운동의 영향은 각베어링 평면에서 동적 외란(dynamic disturbance)으로 작용하여 전자기베어링 시스템에서의 축의 운동에 영향을 준다. 그러므로 베이스 운동이 있는 경우, 고정자에 대한 축의 상대 운동을 안정화시키기 위해서는 양 베어링 평면에서의 베이스 가속도 측정이 필수적이며, 측정된 베이스 가속도를 이용하여 피드포워드(feed-forward) 제어를 수행하는 방식이 효과적임을 알 수 있다.

4. 피드포워드 제어기 설계

베이스 운동이 있는 시스템에 전자기 베어링이 장착된 경우, 전자기 베어링의 위치 안정화를 위하여 외란을 제거할 수 있는 제어기의 설계가 필요하다.

4.1 각도 피드 포워드 제어기

식 (10)과 같이 베이스의 피치 운동에 따른 중력의 영향을 보상하기 위하여 각도 피드 포워드 제어를 제안하였다. 이때 피치각(ϕ)은 각도 센서에 의해 측정되며 Fig. 6은 전체 시스템의 제어 블록 선도이다. G_c 은 PD 제어기에 전력 증폭기가 포함된 전달 함수, G_p 는 전자기 베어링의 전달 함수, $G_{ff,\phi}$ 는 각도 피드 포워드 제어기의 전달 함수이다.

$$G_{ff,\phi} = \frac{G_1}{K_i} \quad (15)$$

여기서, G_1 은 외부 가진과 중력 가속도와외의 전달 함수이다. 중력에 의한 외란 보상은 전달 함수 G_1 과 전류 강성 K_i 의 모형의 정확성에 따라 달라진다.

4.2 가속도 피드 포워드 제어기

베이스의 움직임에 의해 전자기 베어링 시스템에 전달되는 외란을 베이스 가속도 형태로 표현하였으며, 가속도 외란이 고정자에 대한 축의 진동신호에 가장 밀접한 상관관계를 지니고 있다고 가정하였다. 그러므로 베이스의 가속도 신호를 기준신호(reference signal)로 하는 피드포워드 제어기를 구성

하였다.

Fig. 7에서 G_c 는 전력 증폭기, 제어기, 전류 강성 값을 포함한 전달함수를, G_p 는 전자기베어링 축의 운동에 관한 시스템 전달함수를 표현한다. 여기서 G_1 은 베이스가속도가 전자기 베어링의 축에 가진력으로 전달되는 경로를 나타내는 전달 함수이다. 갱신

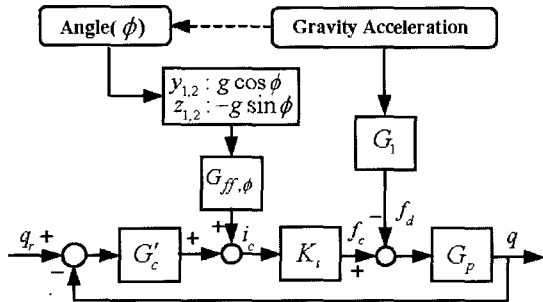


Fig. 6 Block diagram of system with angle feed-forward

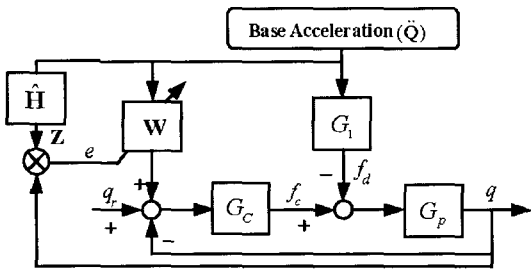


Fig. 7 Block diagram of system with LMS feed-forward

하는 제어 이득을 갖는 normalized filtered-X LMS 알고리즘에 근거한 적응 피드 포워드 제어기는 다음과 같다.

$$\mathbf{W}(k) = [w_0(k) \ w_1(k) \ \dots \ w_i(k)]^T \quad (16)$$

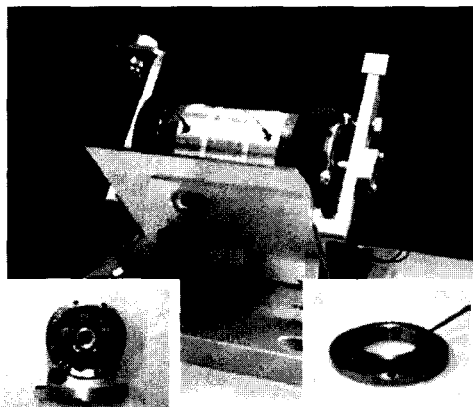
여기서, \mathbf{W} 는 매 단계마다 갱신되는 값이다. 또 응답 오차(e)는 다음과 같이 표현되어진다.

$$e = \frac{\mathbf{q} - \mathbf{W}^T \mathbf{Z}}{\|\mathbf{Z}\|} \quad (17)$$

여기서 \mathbf{q} 는 베이스 가속도 외란에 의한 시스템의 응답 값을 나타내며, \mathbf{Z} 는 기준신호를 오차계 모델(\hat{H})에 의해 필터시킨 신호를 나타낸다. 시간 k 에서의 제어기 가중치 벡터 $\mathbf{W}(k)$ 는 응답오차의 제곱을 최소화하기 위하여 갱신된다. 이와 같이 시스템의 특성을 포함한 적응 제어알고리즘과 측정된 가속도 신호로부터 베이스 외란을 보상할 수 있다. 이때의 적응 필터 계수의 갱신식은 다음과 같다.

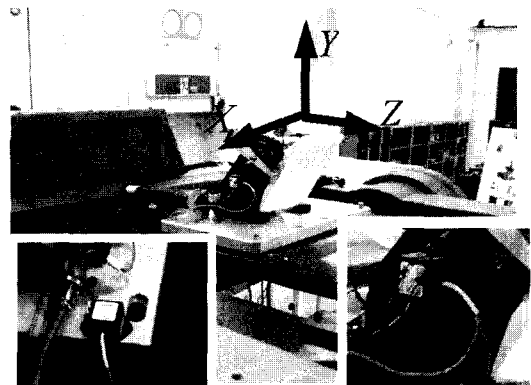
$$\mathbf{W}_{k+1} = \mathbf{W}_k + 2\mu \frac{\mathbf{q}_k \mathbf{Z}_k}{\|\mathbf{Z}_k\|^2} \quad (18)$$

여기서 μ 는 제어시스템의 수렴속도와 안정성을 결정짓는 수렴 상수이다. 일반적으로 LMS 알고리즘은 주기적 외란을 보상하는데 우수한 성능을 가지고 있다.



Radial EM Axial EM

Fig. 8 Prototype AMB system



Tilt Sensor Accelerometer

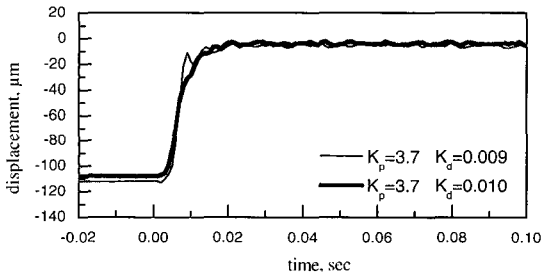
Fig. 9 AMB system on rate table

5. 실험

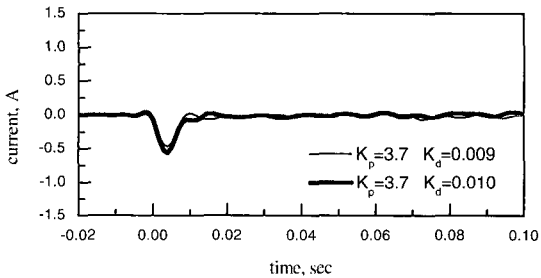
Fig. 8은 실제 실험실에서 제작한 전자기 베어링 시스템과 반경 방향 베어링과 축 방향 베어링의 형상이며 이때의 전자기 베어링의 특성은 Table 1에 나

Table 1 Parameters of AMB system

	Radial EM	Axial EM
Position stiffness	1.14×10^7 N/m	3.94×10^5 N/m
Current stiffness	32 N/A	113 N/A
Air gap	0.3 mm	0.4 mm
Pole face area	155 mm ²	660 mm ²
Coil turns	110	90
Maximum control current	1.5 A	2.0 A



(a)



(b)

Fig. 10 y₁-directional (a) response and (b) its current

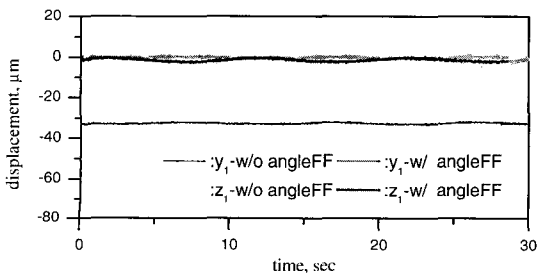
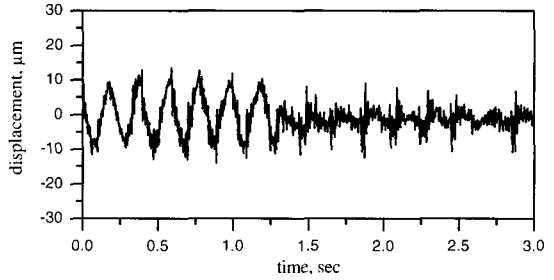
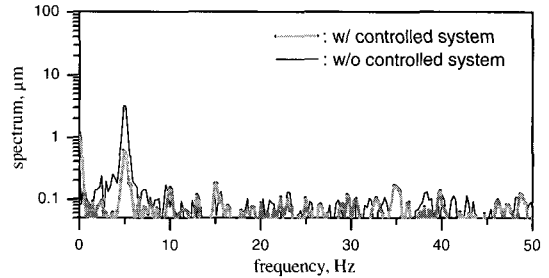


Fig. 11 Response of angle FF controlled system

타내었다. 베이스판을 가진하기 위하여 센서가 장착된 전자기 베어링 시스템을 Fig. 9와 같이 레이트 테이블(rate table)에 장착하였다. 이동차량에 탑재하기 위한 전자기 베어링의 소모 전력량을 알기 위하여 Fig. 10과 같이 부상 실험을 수행하였다. 영구자석이

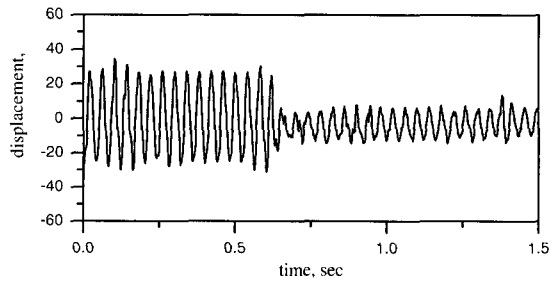


(a)

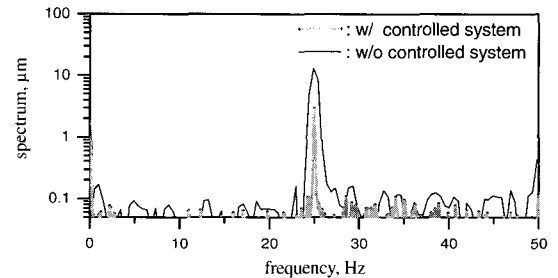


(b)

Fig. 12 (a) Response and (b) its spectrum : 5 Hz



(a)



(b)

Fig. 13 (a) Response and (b) its spectrum : 25 Hz

바이어스 전류 대신 사용되므로, 정상 상태시 인가되는 전류의 양은 매우 미소함을 알 수 있다. 각도 피드 포워드 제어기의 성능을 평가하기 위하여 0.1 Hz, 7°의 각도로 가진하였으며, Fig. 11에 나타난 y_1 방향과 z_1 방향의 중력에 의한 영향은 피드 포워드 제어에 의해 보상됨을 알 수 있다. 각도 피드 포워드 제어기는 중력에 의한 동적 외란뿐 아니라 정적 외란에 대해서도 좋은 성능을 나타낸다. Filtered-X LMS 알고리즘에 사용되는 오차계 모델 필터를 구하기 위하여, PD 제어기에 의한 귀환 제어 입력에 sine sweep 신호를 추가 입력하여 주파수 응답함수를 구하며, 이를 통하여 디지털 필터의 설계가 가능하다.

설계된 디지털 필터를 이용하여 filtered-X LMS 알고리즘을 베이스 외란이 있는 시스템에 대하여 적용하였다. 궤도 차량의 경우에 3~25 Hz 주파수 성분이 베이스에 유입되며, 5 Hz 성분이 주요 성분이다. Fig. 12는 베이스가 5 Hz로 가진 되는 경우이며 피드 포워드 제어기의 작동에 의해 y_1 방향의 응답 값이 안정화되고 있다. 이의 주파수 분석을 통해서 가장 큰 인과관계를 갖는 5 Hz 성분 응답이 15.9 dB 정도 가장 크게 감소하였으며 다른 주파수 성분은 약간의 감소를 보였다. Fig. 13은 베이스가 25 Hz로 가진 되는 경우로 주파수 분석을 통하여 25 Hz 성분이 14.9 dB로 응답이 크게 줄어들었으며, 다른 주파수 영역에서는 거의 변화가 발생하지 않았다.

6. 결 론

이동 차량탑재에 적합한 전자기 베어링을 설계하였다. 설계된 전자기 베어링은 전력 소모를 최소화하기 위하여 영구 자석과 전자석을 사용하였으며, 독립적으로 반경 방향과 축 방향 위치제어가 가능하도록 설계되어 있다.

베이스 움직임에 따른 안정화 성능을 향상시키기 위하여 중력에 의한 외란과 베이스 동적 외란으로 구분하여 베이스 외란의 모형화와 그에 따른 각도 피드 포워드 제어기와 normalized filtered-X LMS 알고리즘을 이용한 피드 포워드 제어기를 설계하였다. 설계된 제어기는 실험을 통하여 성능을 검증하였으며, 궤도 차량의 외란 범위 내에서 우수한 성능을 보였다.

참 고 문 헌

- (1) Cole, M. O. T., et al., 2002, "Control and Non-linear Compensation of a Rotor/magnetic Bearing System Subject to Base Motion," Proc. of the Institution of Mechanical Engineer, Part C, Mechanical Engineering Science, Vol. 216, No. 2, pp. 165~178.
- (2) Kasarda, M. E., Clements, J., Wicks, A. L., Hall, C. D. and Kirk, R. G., 2000, "Effect of Sinusoidal Base Motion on a Magnetic Bearing," IEEE Int. Conf. on Control Applications, Anchorage, Alaska, USA, pp. 144~149.
- (3) Suzuki, Y., 1998, "Acceleration Feedforward Control for Active Magnetic Bearing Systems Excited by Ground Motion," IEE Proceedings of Control Theory and Applications, Vol. 145, No. 2, pp. 113~118.
- (4) Pichot, M. A., et al., 2001, "Active Magnetic Bearing for Energy Storage System for Combat Vehicles," IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 37, No. 1, pp. 318~323.
- (5) 김승중, 김하용, 이중원, 1998, "LMS 알고리즘을 이용한 전자기 베어링계에서의 런아웃 규명," 한국소음진동공학회, 추계학술대회논문집, pp.532~537.