

3 극 자기베어링에서 확장된 영향계수법을 이용한 회전체 불균형 보상 Unbalance Compensation of Rotor in Three-pole Magnetic Bearing System by Extended Influence Coefficient Method

박상현† · 이종원*
Sang-Hyun Park and Chong-Won Lee

1. 서론

이 논문에서는 3 극 자기베어링에서 확장된 영향계수법(Extended Influence Coefficient Method)을 이용한 회전체의 불균형보상법을 소개한다. 여기서 3 극 자기베어링은 극의 형상과 같은 잉여좌표계와 각 축에 동일한 PD 제어를 적용하여 비연성 선형화 되어 세 개의 독립적인 영향계수를 이용한 회전체의 불균형 보상 방법을 설명하고 이를 실험을 통해서 그 효용성을 입증하고자 한다.

2. 본론

2.1 잉여좌표계를 이용한 3 극 자기베어링의 운동 방정식

그림 1 은 잉여좌표계(q_1, q_2, q_3)를 이용한 3 극 자기 베어링의 모형이며 여기서 K^* 는 등가 위치강성을 $f_k, k=1,2,3$ 는 각 축의 전자기력을 의미한다.

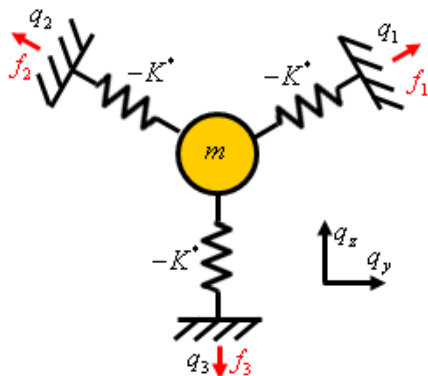


Fig. 1. Modeling of the 3-pole magnetic bearing

† 교신저자; KAIST 기계공학과
E-mail : ppark-0525@kaist.ac.kr
Tel : (042) 350-3056, Fax : (042) 350-8220
* 정희원, KAIST 기계공학과

잉여좌표계를 이용한 3 극 자기베어링의 선형화 운동방정식은 다음과 같다.

$$\frac{2}{3}m[\mathbf{I}]\begin{Bmatrix} \ddot{q}_1 \\ \ddot{q}_2 \\ \ddot{q}_3 \end{Bmatrix} + (-K^*)[\mathbf{I}]\begin{Bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{Bmatrix} = \frac{1}{3}\begin{pmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{pmatrix}\begin{Bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \end{Bmatrix} \quad (1)$$

여기에서 질량과 강성 행렬은 대각화 되며 연성항이 없음을 알 수 있으나 전자기력 행렬은 서로 연성되었음을 알 수 있다. 이 연성 항을 없애기 위해서 본 논문에서는 각 축에 독립적인 PD 제어를 제안하였고, 이를 적용하면 각 축의 전자기력은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$f_j = K_i i_j = -K_i K_A K_s [K_p q_j + K_d \dot{q}_j], j=1,2,3 \quad (2)$$

여기에서 K_i 는 전류강성, i_j 는 각 축의 제어전류를 의미하며 K_s, K_A 는 각각 센서와 전력증폭기 계인을 나타낸다. 그리고 K_p, K_d 는 P, D 계인을 말한다. 식(2)를 식(1)에 적용하고 구속조건($q_1+q_2+q_3=0$)를 적용하면 운동방정식은 다음과 같이 대각화된다.

$$\frac{2}{3}m[\mathbf{I}]\{\ddot{\mathbf{q}}\} + K_d^*[\mathbf{I}]\{\dot{\mathbf{q}}\} + (K_p^* - K^*)[\mathbf{I}]\{\mathbf{q}\} = \{\mathbf{0}\} \quad (3)$$

, where $K_d^* = K_i K_A K_s K_d, K_p^* = K_i K_A K_s K_p$

2.2 영향계수법을 이용한 회전체 불균형 보상

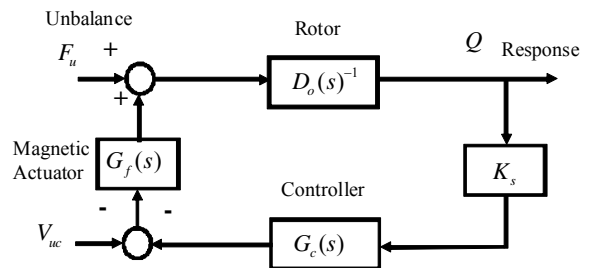


Fig. 2. Block diagram of AMB system

그림 2 는 회전체의 불균형량을 고려한 자기베어링 시스템의 블록 다이어그램이다. 여기서 회전체의 불균형량에 의한 가진힘, $F_u = \Omega^2 U$ 과 보상신호, V_{uc} 에 의한 회전체의 응답을 주파수 영역에서 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$Q(j\omega) = H_u(j\omega)U + H_v(j\omega)V_{uc}(j\omega), \quad \text{at } \omega = \Omega \quad (4)$$

여기서 H_u 와 H_v 는 각각 측정된 응답과 회전체의 불균형량, U 그리고 보상신호, V_{uc} 사이의 주파수 응답 함수를 의미한다.

회전체의 보상을 위해서 같은 회전속도에서 두 개의 실험이 필요하다. 먼저 어떠한 보상 신호를 인가하지 않고 응답을 측정할 때 이는 식 (5)와 같다. 이어서 같은 회전속도와 제어게인을 적용하고 시험 보상 신호를 임의로 인가하여 회전체의 응답 (6)을 측정한다.

$$Q_0(\Omega) = H_u(j\Omega)U_0 \quad (5)$$

$$Q_i(\Omega) = Q_0(\Omega) + H_v(j\Omega)V_i(\Omega) \quad (6)$$

식(5)와 (6)을 이용해서 영향계수 H_v 를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$H_v(j\Omega) = \frac{Q_i(\Omega) - Q_0(\Omega)}{V_i(\Omega)} \quad (7)$$

식(7)을 식(4)에 적용하여 회전체 불균형 보상신호를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$V_{uc}(j\Omega) = H_v(j\Omega)^{-1}Q_0(\Omega) \quad (8)$$

3. 실험 결과

제안된 회전체 불균형 보상법을 검증하고자 실험장치를 구성하였으며 구성된 3 극 자기베어링의 주요 사양은 표 1 과 같다.

Table1 Specifications of the three-pole AMB system

Rotor mass (m)	0.19 kg
Displacement stiffness (K^x)	-4.86×10^4 N/m
Current stiffness (K_i)	10.07 N/A
Sensor gain (K_s)	5000 V/m
Power Amp. Gain (K_A)	1.0 A/V
Control gain	$K_p=3.0$
	$K_d=0.004$

제안된 회전체 불균형 보상법을 적용하기 위해서 먼저 보상신호를 인가하지 않고 3800 rpm에서 회전체의 응답, Q_0 을 측정하였다.

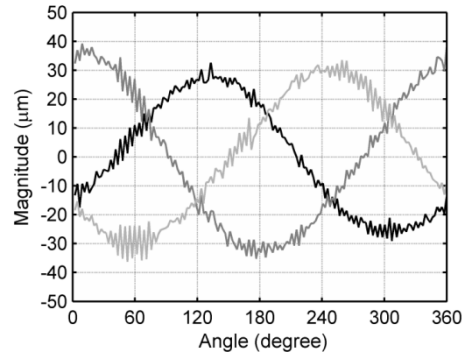


Fig.3 Original displacement, Q_0
: — q_1 , — q_2 , — q_3

그리고 같은 회전 속도에서 시험보상 신호, V_t 를 5mV의 120도의 위상을 갖도록 자기베어링에 각각 인가하고 측정된 회전체 응답, Q_i 를 측정한다. 이를 이용하여 식(8)에서 보상신호 V_{uc} 를 각각 구할 수 있다. ($V_{uc}^1=0.069 \angle -12.03^\circ$ (V), $V_{uc}^2=0.126 \angle 112.30^\circ$ (V), and $V_{uc}^3=0.132 \angle -121.47^\circ$ (V)) 그리고 이 보상신호를 적용한 결과 그림 4와 같이 회전체의 불균형량에 의한 응답이 효과적으로 줄어드는 것을 알 수 있었다.

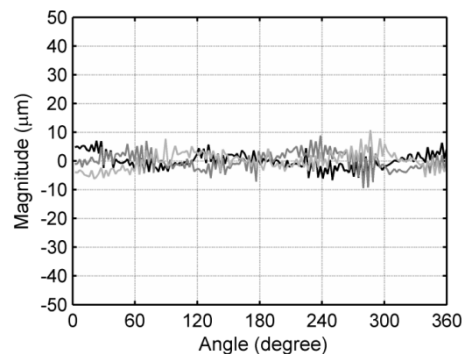


Fig.4 Compensated displacement

4. 결론

논문에서는 3 극 자기베어링의 불균형 응답을 효과적으로 보상해주기 위해서 잉여좌표계를 사용한 비연성 선형화 모형을 바탕으로 확장된 영향계수법을 이용하여 회전체의 불균형 응답을 보상하는 법을 소개하고 실험을 통해 효용성을 입증하였다.