

자기베어링을 이용한 잔류질량불균형이 존재하는 초고속 회전체의 온라인 밸런싱

송상호*, 박영진*, 정성종**

On-line Balancing of a Ultra-high speed Rotor with Residual Unbalance

Sang-Ho Song*, Young-Jin Park*, Sung-Chong Chung**

Abstract

In order to minimize vibration problems of rotating machinery rotors have been assembled through balancing machines. Since perfect balancing is impossible, residual unbalances cause serious vibration while the rotor is in high speed region. To minimize unbalance effects of magnetic bearing systems(AMB) during rotation on-line balancing methodology was studied. Unbalances were considered as disturbances of the system. The disturbance observer was used to estimate unbalance forces from measurable state and input variables. Balancing inputs computed according to LQR and outputs of the observer were applied to eliminate unbalances during high speed rotation of the AMB. The effectiveness of the on-line balancing was verified through numerical simulations.

Keywords : Disturbance observer(외란관측기), Magnetic bearing(자기베어링), On-line balancing(온라인 밸런싱), Residual mass unbalance(잔류질량불균형), Ultra-high-speed rotor(초고속회전체)

1. 서론

회전기계에서 질량불균형이 존재하는 회전체는 회전속도의 제곱에 비례하는 불균형력을 발생시킨다. 이러한 불균형력에 의한 회전체의 진동은 베어링의 수명을 단축시

킬 뿐만 아니라, 공작기계 주축, 터빈, 분자펌프, 원심분리기 등의 회전기계에서 진동 및 소음 발생의 원인이 된다.

따라서 대부분의 회전기계에 들어가는 회전체는 그 용도 및 정격 회전속도에 따라 정해진 등급으로 밸런싱을 수행한 후 조립된다. 그러나 밸런싱된 후에도 회전체에는

* 한양대학교 대학원 기계설계학과

** 한양대학교 기계설계학과

등급에 따라 어느 정도의 잔류질량불균형이 존재하는데, 예를 들어 밸런싱 등급이 G 2.5인 터보 압축기 회전체의 잔류질량불균형량은 회전속도 5000 rpm에서 약 4.8 $\mu\text{m/kg}$ 이 된다. 이러한 잔류질량불균형에 의한 불균형력은, 정격 회전속도이하에서 동작할 때는 크게 문제가 되지 않으나, 그 이상의 고속으로 회전하는 경우에는 심각한 회전체의 진동을 발생시켜 회전기계의 성능을 저하시킨다⁽¹⁾.

특히 초고속 회전을 위하여 자기베어링에 의해 무접촉으로 지지되는 회전체도 저속용 회전체와 마찬가지로 상용 밸런싱기계에 의해 오프라인 밸런싱이 수행된 후에 자기베어링과 조립된다. 이러한 밸런싱방법은 상대적으로 저속에서 수행될 수밖에 없으므로, 자기베어링시스템의 정격 회전속도에 해당하는 등급으로 회전체를 밸런싱하는 것은 현실적으로 불가능하다. 따라서 이러한 오프라인 밸런싱이 수행된, 자기베어링시스템의 초고속용 회전체에도 일반적인 저속용 회전체와 비슷한 크기의 잔류질량불균형이 존재하게 되는데, 이로 인해 정격 회전속도에서 회전체의 커다란 선회운동(Whirl) 및 베어링 지지부의 진동이 발생하는 등, 자기베어링시스템의 성능이 저하된다. 그러나 기존의 수동형베어링과는 달리 자기베어링은 전자기력을 제어하여 정격 회전속도에서 이러한 잔류질량불균형에 의한 불균형력을 제거하는 온라인 밸런싱을 수행할 수 있다.

D.Dhar와 L.E.Barret⁽²⁾는 불균형력 또는 조화가진력을 받는 다중질량의 유연한 회전체를 지지하는 자기베어링시스템의 제어력과 베어링강성, 그리고 감쇠계수를 계산하는 방법을 제시하였고, Hisatani와 Koizumi⁽³⁾는 회전체의 질량불균형에 의한 진동을 억제하기 위하여 두 종류의 새로운 적응필터링 방법을 제시하였다. Matsumura⁽⁴⁾등은 회전체가 관성축을 중심으로 회전하도록 자기베어링시스템을 모델링하였고, 그결과를 바탕으로 넓은 범위의 회전속도에서 내부 안정도를 유지시키며 불균형력을 제거할 수 있는 최소화 관측기 및 제어기를 설계하였다. Mouille와 Lottin⁽⁵⁾은 자기베어링시스템의 회전체에 작용하는 일정한 크기의 외란 및 정현파 외란을 관측기를 통해 추정할 수 있음을 보였다. Taguchi⁽⁶⁾등은 Kalman 필터를 사용하여 실시간으로 자기베어링시스템의 전달함수 및 불균형량을 규명하고, 이를 근거로 계산된 제어신호를 기존의 아날로그 PID 제어입력에 더하는 제어알고리즘을 통해, 터빈 블레이드 손상과 같은 갑작스런 외란에 의한 회전체의 선회운동을 억제하였다.

본 연구에서는 2개의 반경방향 자기베어링과 잔류질량 불균형을 가진 회전체로 이루어진 자기베어링시스템에서,

회전체의 불균형력을 시스템에 작용하는 외란으로 간주하고, 이를 실시간으로 추정할 수 있는 관측기를 설계한다. 다음으로 제어시스템을 안정화하기 위한 LQR 제어입력에 추정된 불균형력을 제거하는 제어입력을 더함으로써, 자기베어링의 자기력을 이용하여 초고속 회전체의 온라인 밸런싱을 수행한다.

2. 회전체-베어링시스템의 모델링

2.1 자기베어링의 자기력

Fig. 1은 2개의 반경방향 자기베어링에 의해 지지되는 강체 회전체와 각 방향의 전자석에 의해 회전체에 가해지는 자기력을 도시한 것이다. 전자석의 자기력은 회전체와 전자석간의 공극(air-gap)의 제곱에 반비례하고, 코일에 흐르는 전류의 제곱에 비례하는 비선형함수이나, 자기베어링의 동작점인 중심위치에서 선형화하면 다음과 같이 된다.

$$F_r \approx K_r r + K_{ir} i_r \quad (1)$$

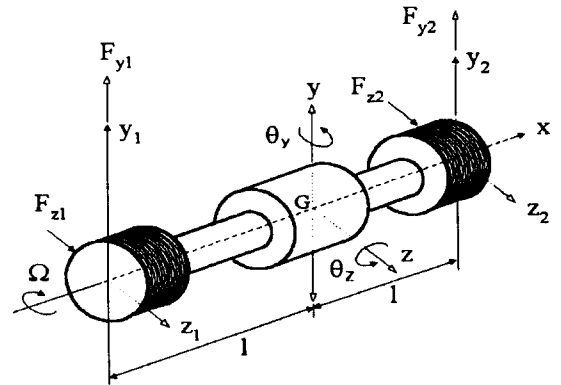


Fig. 1 Coordinates of rotor suspended by 2 radial magnetic bearings

여기서, $r (= y_1, y_2, z_1, z_2)$ 은 베어링 중심에서의 회전체의 미소변위이며, i_r 은 각 방향 전자석의 제어전류이다. 또한 K_r 은 회전체와 전자석의 상대운동에 따른 공극의 변화에 대한 자기력의 변화로 위치강성계수, K_{ir} 은 전류에 대한 자기력의 변화로 전류강성계수라 한다⁽⁷⁾. 본 연구에서는 각 전자석의 특성은 동일하다고 가정한다^(4, 8)

2.2 질량불균형이 존재하는 회전체-베어링시스템의 지배방정식

질량불균형이 존재하는 강체 회전체는 두 방향의 병진 운동과 두 방향의 회전운동을 하는 4자유도계로 모델링할 수 있으므로, 무게중심점 G 에 대한 회전체-베어링시스템의 지배방정식은 식(1)의 선형화된 자기력을 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다^(4, 5, 8).

$$M\ddot{q} + G\dot{q} + Kq = E i_r + w(t) \quad (2)$$

여기서, $M = \text{diag}[m, m, I_d, I_d]$.

$$G = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I_p\Omega \\ 0 & 0 & -I_p\Omega & 0 \end{bmatrix}$$

$$K = \begin{bmatrix} -2K_r & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -2K_r & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -2l^2K_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -2l^2K_r \end{bmatrix}$$

$$E = \begin{bmatrix} K_{ir} & K_{ir} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & K_{ir} & K_{ir} \\ 0 & 0 & lK_{ir} & -lK_{ir} \\ -lK_{ir} & lK_{ir} & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

위 식에서 M 은 질량행렬, G 는 회전에 따른 자이로효과를 나타내는 행렬이며, K 는 강성행렬이고, $E i_r$ 은 제어 전류에 의해 발생하는 각 전자석쌍의 전자기력을 회전체의 무게중심점에 대한 좌표로 옮겨 표현한 것이다. 또한 $w(t)$ 는 회전체의 잔류질량불균형에 의한 효과를 나타내는 항이다. 잔류질량불균형의 효과는 Fig. 2 (a)에서 보듯이 회전체의 무게중심 G 와 회전중심 G^* 사이의 편심량 ϵ 을 발생시키고, Fig. 2(b)에서 보듯이 기하학적 중심축과 회전축 사이의 편각 τ 를 발생시킨다. 회전체가 일정한 속도 Ω 로 회전할 때 발생하는 불균형 힘과 모멘트는 식(3)과 같다. 여기서 α 와 β 는 각각 잔류질량불균형의 초기위상을 가리킨다^(5, 8).

$$w(t) = \begin{bmatrix} m\epsilon\Omega^2 \cos(\Omega t + \alpha) \\ m\epsilon\Omega^2 \sin(\Omega t + \alpha) \\ (I_d - I_p)\tau\Omega^2 \cos(\Omega t + \beta) \\ (I_d - I_p)\tau\Omega^2 \sin(\Omega t + \beta) \end{bmatrix} \quad (3)$$

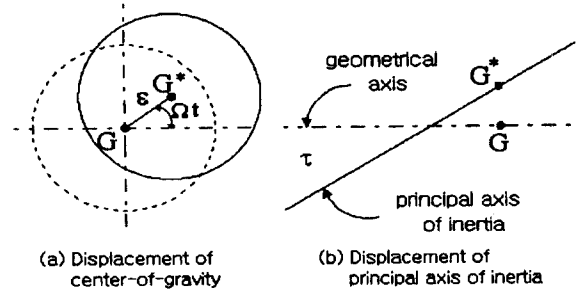


Fig.2 Effects of residual mass unbalance

실제로 회전체의 변위가 측정되고 제어되는 곳은 회전체의 무게중심점이 아니라 각 베어링의 위치이므로 식(4)의 좌표변환 관계를 이용하여 회전체-베어링시스템의 지배방정식을 다시 쓰면 식(5)와 같이 표현할 수 있다⁽⁷⁾.

$$r = Hq \quad (4)$$

$$M_r \ddot{r} + G_r \dot{r} + K_r r = E_r i_r + H^{-T} w(t) \quad (5)$$

여기서, $q = [y, z, \theta_y, \theta_z]^T$

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -l \\ 1 & 0 & 0 & l \\ 0 & 1 & l & 0 \\ 0 & 1 & -l & 0 \end{bmatrix}$$

2.3 상태방정식

식(5)에서 질량불균형이 존재하는 회전체-베어링시스템의 각 베어링 위치에서 회전체의 변위와 속도를 상태변수로 하고, 킵센서를 통한 회전체의 변위를 출력변수로 하면 식(6)과 같은 상태방정식을 얻을 수 있으며, 질량불균형에 의한 외란의 동특성은 식(7)로 표현할 수 있다^(3, 8).

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + Dw(t) \quad (6)$$

$$\dot{w}(t) = Ew(t) \quad (7)$$

여기서,

$$x(t) = [y_1, y_2, z_1, z_2, \dot{y}_1, \dot{y}_2, \dot{z}_1, \dot{z}_2]^T,$$

$$u(t) = [i_{y1}, i_{y2}, i_{z1}, i_{z2}]^T$$

$$A = \begin{bmatrix} O_4 & I_4 \\ -M_r^{-1}K_r & -M_r^{-1}G_r \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} O_4 \\ M_r^{-1} E_r \end{bmatrix} \quad D = \begin{bmatrix} O_4 \\ M_r^{-1} H^{-T} \end{bmatrix}$$

$$E = \begin{bmatrix} 0 & -\Omega & 0 & 0 \\ \Omega & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\Omega \\ 0 & 0 & \Omega & 0 \end{bmatrix}$$

3. 제어시스템 설계

제어시스템은 Fig. 3에서 나타낸 바와 같이 두 부분으로 구성된다. 첫번째는 고속회전에 따른 자이로효과 및 잔류질량불균형에 대해 시스템의 내부 안정도를 만족시켜주는 안정화 제어루프이며, 두번째는 관측기를 통해 외란 신호를 추정하고, 추정된 신호를 이용하여 외란을 제거하는 제어루프이다. 따라서 전체 제어입력은 식(8)과 같은 두 제어입력의 합으로 나타나게 된다^(4, 8).

$$u(t) = u_1(t) + u_2(t) \quad (8)$$

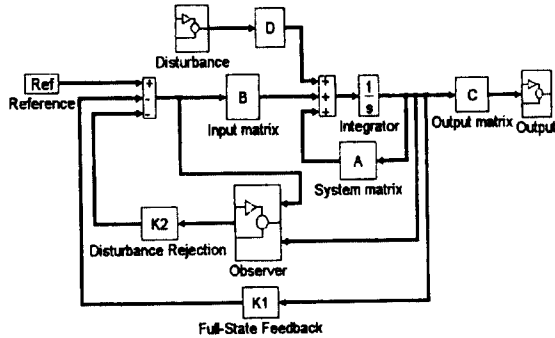


Fig.3 Overall block diagram of the magnetic bearing system

3.1 안정화 제어기

자기베어링시스템은 전자석 고유의 특성때문에 음의 강성을 갖는 불안정한 시스템일 뿐아니라, 회전체가 고속으로 회전하게 되면 자이로효과 및 질량불균형의 효과가 매우 커지게 되므로 시스템을 안정화시켜야 있다. 이를 위해 LQR 이론을 이용하여 구한 안정화 제어입력은 식(9)와 같다⁽⁷⁾.

$$u_1(t) = -K_1 x(t) \quad (9)$$

3.2 외란관측기 설계

밸런싱작업 후에도 회전체에 남아있는 잔류질량불균형에 의한 불균형력을 자기베어링시스템에 가해지는 외란으로 간주하고^(5, 8), 측정가능한 신호인 $x(t)$ 와 제어입력 $u(t)$ 를 이용하여 이 외란을 추정하는 관측기를 설계하기 위해 적당한 4×8 행렬 V 를 이용하여, 다음을 정의한다⁽⁸⁾.

$$z(t) = \hat{w}(t) - Vx(t) \quad (10)$$

식(10)을 미분하여 식(6)과 (7)의 관계를 대입하면, 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{z}(t) &= \dot{\hat{w}}(t) - V\dot{x}(t) \\ &= (E - VD)z(t) \\ &\quad + (-VA + EV - VDV)x(t) - VBu(t) \end{aligned} \quad (11)$$

식(11)에서 행렬 $E - VD$ 의 고유치에 따라, 관측기에 의한 추정신호가 원래의 외란신호에 접근하는 속도가 결정된다. 이 행렬을 성분으로 표시하면 식(12)와 같이 된다. 식(12)에서 보듯이 행렬 $E - VD$ 의 성분들은 행렬 V 의 32개 요소들 중에 16개의 요소들만 결정하면 됨을 알 수 있다.

$$E - VD = \begin{bmatrix} \frac{v_{13} + v_{16}}{m} & -\Omega & \frac{v_{15} + v_{18}}{m} & -\frac{I(v_{11} - v_{14})}{I_d} & \frac{I(v_{13} - v_{16})}{I_d} \\ \Omega & \frac{v_{17} + v_{20}}{m} & -\frac{I(v_{19} - v_{22})}{I_d} & \frac{I(v_{17} - v_{20})}{I_d} & \frac{I(v_{15} - v_{18})}{I_d} \\ -\frac{v_{13} + v_{16}}{m} & -\frac{v_{15} + v_{18}}{m} & -\frac{I(v_{11} - v_{14})}{I_d} & -\Omega & \frac{I(v_{13} - v_{16})}{I_d} \\ -\frac{v_{17} + v_{20}}{m} & -\frac{v_{19} + v_{22}}{m} & \Omega & -\frac{I(v_{19} - v_{22})}{I_d} & \frac{I(v_{17} - v_{20})}{I_d} \end{bmatrix} \quad (12)$$

따라서, 식(10), (11), 그리고 (12)의 결과를 이용하면 외란신호의 추정치 $\hat{w}(t)$ 는 다음과 같이 구할 수 있다

$$\hat{w}(t) = z(t) + Vx(t) \quad (13)$$

3.3 외란제거 제어기

관측기를 통해 추정된 외란신호를 이용하여 자기베어링시스템의 잔류질량불균형에 의한 불균형력을 제거하기 위한 제어입력은 식(14)의 형태로 나타난다^(5, 8).

$$u_2(t) = -K_2 \hat{w}(t) \quad (14)$$

위 식에서 외란제거 제어기의 계인을 결정하기 위해, 식(14)를 식(6)에 대입한다.

$$\dot{x}(t) = Ax(t) - BK_2 \hat{w}(t) + Dw(t) \quad (15)$$

여기서 설계된 관측기가 시스템의 외란신호를 정확하게 추정한다고 하면, 즉 $\hat{w}(t) \approx w(t)$ 의 관계가 성립한다면, $D - BK_2 = 0$ 의 조건을 만족시키는 제어계인 K_2 는 식(16)과 같이 구할 수 있다.

$$K_2 = (B^T B)^{-1} B^T D \quad (16)$$

따라서 관측기를 이용한 제어입력 $u_2(t)$ 에 의해, 회전체의 잔류질량불균형에 의한 불균형력은 제거되어 회전체의 온라인 밸런싱이 이루어진다.

4. 시뮬레이션

자기베어링시스템의 특성은 회전체의 회전속도에 따라 변하므로 정격 회전속도 20000 rpm을 기준으로 설계된 제어기 및 관측기를 이용하여 온라인 밸런싱이 수행되는 과정을 시뮬레이션 해보았다. 시뮬레이션을 위한 시스템의 파라미터들은 Table 1에 나타내었다. 정격회전속도 20000 rpm에서 안정화 제어계인 K_1 , 관측기의 변환행렬 V 및 외란제거 제어계인 K_2 는 각각 아래와 같다.

Table 1. Parameters of the magnetic bearing system

Parameters	Letter	Value	Unit
Rotor mass	m	2.5	kg
Polar moment of Inertia	I_p	0.00276	$\text{kg} \cdot \text{m}^2$
Lateral moment of Inertia	I_l	0.1089	$\text{kg} \cdot \text{m}^2$
Bearing span	l	0.12	m
Displacement stiffness	K	9.5318E7	N/m
Current stiffness	K_c	1.4298E4	N/A
Eccentricity	ϵ	10	μm
Eccentric angle	τ	0.1	degrees

$$K_1 = \begin{bmatrix} 13334 & 0 & 35 & -35 & 2 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 13334 & -35 & 35 & -1 & 2 & 0 & 0 \\ -35 & 35 & 13334 & 0 & 0 & 0 & 2 & -1 \\ 35 & -35 & 0 & 13334 & 0 & 0 & -1 & 2 \end{bmatrix}$$

$$V = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1000 & 1000 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1000 & 1000 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 500 & -500 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -500 & 500 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$K_2 = 10^{-5} \times \begin{bmatrix} 3.4971 & 0 & 0 & -29.142 \\ 3.4971 & 0 & 0 & 29.142 \\ 0 & 3.4971 & 29.142 & 0 \\ 0 & 3.4971 & -29.142 & 0 \end{bmatrix}$$

먼저, 회전체가 시스템의 정격 회전속도인 20000 rpm으로 회전할 때, 자기베어링이 존재하는 y-z 평면상의 회전체 변위를 Fig. 4에 나타내었다. 초기에 안정화 제어기만을 사용하였을 때, 회전체는 잔류질량불균형에 의해 대략 27 μm 정도의 일정한 반경을 갖는 선회운동을 한다. 그러나 설계된 관측기를 이용하여 구해진 제어입력을 기존의 안정화 제어입력에 더함으로써, 이러한 불균형력이 제거되어 회전체의 선회운동은 사라진다. 따라서 자기베어링을 이용한 회전체의 온라인 밸런싱이 이루어졌음을 알 수 있다. 온라인 밸런싱 전후의 제어입력 변화를 Fig. 5에 도시하였는데, 밸런싱 후의 제어입력이 전보다 더 감소함을 볼 수 있다. 이는 밸런싱이 수행되면서 회전체의 변위가 감소됨에 따라, 상태 피드백에 의한 안정화 제어입력이 줄어들고, 관측기에 의한 제어입력만이 시스템에 작용하기 때문이다. Fig. 6는 설계된 관측기의 외란추정성을 나타낸 것으로, 0.02초에서 관측기가 작동되어 외란신호를 추정하며, (a)는 불균형력, (b)는 불균형모멘트에 대한 추정오차를 각각 도시한 것이다. 추정오차는 관측기 작동 후 약 0.005초 지난 후에 거의 0으로 수렴하는 것을 볼 수 있다.

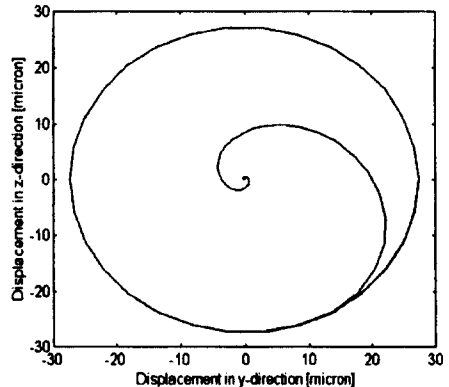


Fig.4 Rotor displacements in y-z plane at 20000rpm

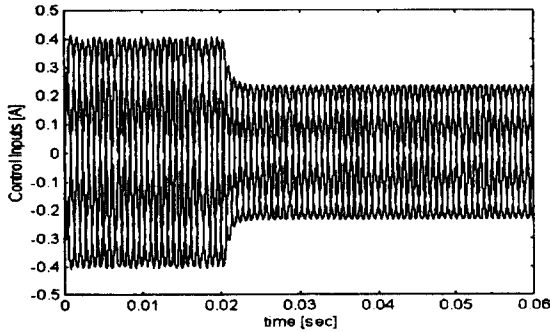


Fig.5 Control inputs at 20000 rpm

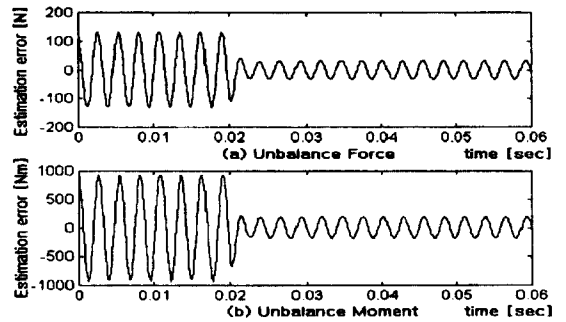


Fig.8 Disturbance estimating performance at 22000 rpm

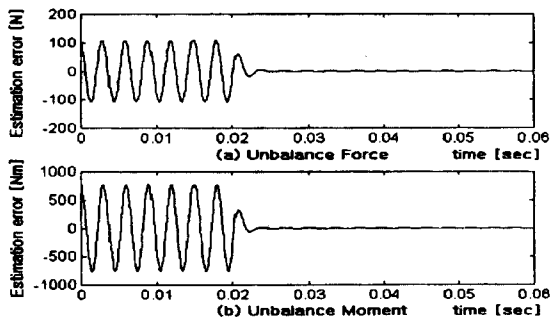


Fig.6 Disturbance estimating performance at 20000 rpm

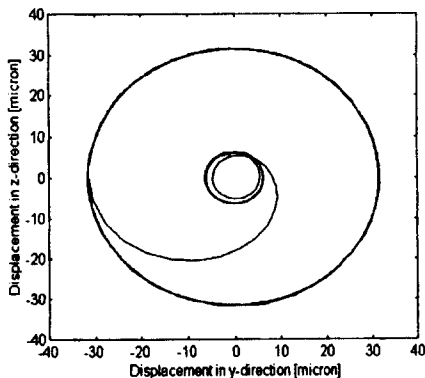


Fig.7 Rotor displacements in y-z plane at 22000 rpm

다음으로, 회전체의 회전속도를 정격 회전속도보다 10% 증가한 22000 rpm으로 하여 온라인 밸런싱을 수행해 보았다. Fig. 7에서 볼 수 있듯이, 회전속도가 증가하였으므로 질량불균형의 영향 또한 증가하여, 회전체는 대략 $31\mu\text{m}$ 정도의 초기 선회운동을 일으키다가 관측기에 의한 제어입력에 의해 정상상태에서 약 $6\mu\text{m}$ 정도의 선회운동을 한다. 이는 회전속도 20000 rpm에 대해 고정된 계인을 갖도록 설계된 관측기의 성능한계에 의한 것이다. 설계된 관측기의 추정성능을 Fig. 8에 나타내었다. 그림에서 보듯이 관측기는 시스템의 외란을 정확히 추정하지 못하고, 어느 정도의 오차를 보이고 있다.

5. 결론

자기베어링에 의해 무접촉으로 지지되는 초고속 회전체의 저속 오프라인 밸런싱 후 남아있는 잔류질량불균형에 의해 발생하는 회전체의 진동을, 자기베어링의 전자기력을 제어함으로써, 제거하는 온라인 밸런싱을 수행하였다.

회전체의 잔류질량불균형에 의한 불균형력을 자기베어링시스템에 가해지는 외란으로 간주하고, 이를 추정하는 관측기를 설계하였다. 추정된 외란을 이용하여 불균형력을 제거하는 제어입력을 구하고, 이를 안정화 제어입력에 부가시켜 불균형력에 의한 회전체의 진동을 억제하였다.

이러한 온라인 밸런싱은 회전체의 정밀도를 높이고, 제어입력을 감소시켜 자기베어링시스템의 전력손실을 줄이는 등, 자기베어링시스템의 성능을 향상시킨다.

참 고 문 헌

1. C.M.Harris, Shock and Vibration Handbook 4th ed., McGRAW-HILL, New York, 1996.
2. D.Dhar, L.E.Barret, "Design of Magnetic Bearings for Rotor Systems With Harmonic Excitations", Trans. of ASME J. of Vibration and Acoustics, Vol. 115, pp. 359~366, 1993.
3. M.Hisatani, T.Koizumi, "Adaptive Filtering for Unbalance Vibration Suppression", Proc. of Fourth International Symposium on Magnetic Bearings, ETH Zurich, pp. 125~130, 1994.
4. F.Matsumura, M.Fujita, K.Okawa, "Modeling and Control of Magnetic Bearing Systems Achieving a Rotation Around the Axis of Inertia", Proc. of 2nd International Symposium on Magnetic Bearing, Tokyo, pp. 273~280, 1990.
5. P.Mouille, J.Lottin, "Unbalancing estimation in active magnetic bearings", Proc. of 2nd International Symposium on Magnetic Bearing, Tokyo, pp. 281~288, 1993.
6. N.Taguchi, T.Ishimatsu, S.J.Woo, C.Gaehler, "Unbalance Compensation of Magnetic Bearings", IECON '94, pp. 2051~2056, 1994.
7. 박영진, 김승철, 정성종, "능동자기베어링시스템의 디지털제어", 한국정밀공학회 '95년도 추계학술대회논문집, pp. 311~316, 1995.
8. T.Mizuno, T.Higuchi, "Compensation for Unbalance in Magnetic Bearing Systems." 日本計測自動制御學會論文集, Vol. 20, No. 12, pp. 23~29, 1984.