

〈論 文〉

자기 베어링의 성능한계를 고려한 작동특성 연구

Performance Study of Magnetic Bearing Considering the Performance Limit

장 인 배* · 한 동 철*

In-Bae Chang and Dong-Chul Han

(1994년 10월 21일 접수 ; 1995년 1월 25일 심사완료)

ABSTRACT

In this study, we investigated the operational limit of magnetic bearing-rotor system due to the maximum force limit and slew rate limit of the electromagnetic actuator as a function of the time dependent control characteristics. The feedback gain of the controller varies the current of the electromagnet coil with the motion of the rotor. The distortion of magnetic force due to the slew rate limit is not occurred up to 30,000 rpm in the magnetic bearing that we have a close relation with the rotational speed and vibration level of the rotor and the proportional gain of the controller. Therefore the maximum force limit determines the maximum allowable orbit radius of the magnetic bearing-rotor system. The maximum allowable vibration levels are exponentially decreased according to the increment of rotational speed and proportional gain of the controller.

기 호 설 명

A : Pole face area
 B : Flux
 F : Magnetic force
 g_0 : Nominal bearing gap
 H : Magnetic field strength
 I, i : Current
 K_{iz} : Actuator gain for vertical direction
 K_{zz} : Position stiffness for vertical direction
 L_c : Coil inductance
 N : Coil winding turns
 R : Resistance
 t : Time

V_c : Supply voltage
 μ_0 : Permeability in air gap
 Φ_g : Maximum magnetic flux in air gap
 Φ_p : Maximum magnetic flux in pole

1. 서 론

자기 베어링은 일반적인 구름요소 베어링이나 유체 베어링과는 달리 베어링 요소 자체가 갖는 제어 특성 및 전기적 특성 등에 기인하여 자기 베어링의 하중 지지나 작동 주파수 등과 같은 작동성능의 한계가 존재한다. 이와 같은 자기 베어링의 작동성능 한계를 고찰하므로써, 새로운 자기 베어링-회전축 시스템의 설계시 주어진 작동조건을 만족시키는 자기 베어링의 구체적인 사양들을 결정할 수 있다. J. Imlach 등⁽¹⁾은 이론적으로 도출된 자기 베어링의 강

*서울대학교 터보·동력기계연구센터 연수연구원

**정회원, 서울대학교 공과대학 기계설계학과

성 및 감쇠비와 측정치 사이의 차이를 고찰하였으며, J. D. Knight 등⁽²⁾은 유한요소법을 사용하여 자기 베어링의 자기력을 계산하였다. 그리고 F. J. Keith 등⁽³⁾은 이론적으로 도출된 자기력과 측정된 자기력간의 차이를 규명하였다. 또한 E. Maslen 등⁽⁴⁾은 전자석 작동기의 성능한계를 최대 자기력 및 최대 자기력 변화율의 관점에서 고찰하였다. 그러나, 이 연구에서는 제어기와 그에 따른 제어전류의 시간함수적인 변화가 고려되지 않았다. 그러나 자기 베어링은 실제적으로 제어기와 귀환제어 루프를 구성하고 있으므로 자기 베어링의 작동속도 증가에 따른 제어기의 귀환이득의 변화가 자기 베어링의 작동특성을 변화시키며, 이에 따라 자기 베어링의 작동성능 한계를 결정짓는 인자도 변하게 된다. 그러므로, 본 논문에서는 회전축의 정현 함수적인 회전궤적에 따른 제어기의 시간함수적인 제어특성과 그에 따른 시간함수적인 전자석 작동기 제어 전류의 변화를 고려하여 자기 베어링의 작동성능 한계를 결정하는 인자에 대한 고찰을 수행한다. 고려할 자기 베어링의 작동성능은 최대 하중지지 용량과 최대 자기력 변화율이다. 자성 재료의 자속은 자장 강도의 증가에 따라 증가하지만 일정수준 이상을 넘으면 자장 강도가 증가해도 자속이 더 이상 증가하지 않는 자속의 포화(saturation)가 발생한다. 최대 자기력 한계는 전자석 작동기가 이론적으로 구현할 수 있는 최대 견인자력으로, 자성재료의 자속 포화수준을 그 한계값으로 한다. 또한, 전자석 작동기는 자성 재료에 코일을 감은 형태로, 코일의 인덕턴스에 기인하여 자기력의 시간당 변화율에는 어떤 한계가 존재한다.

본 논문에서는 자기 베어링의 이론상 구현 가능한 최대 자기력 및 자기력 변화율 한계를 토대로 하여 자기 베어링에 지지되는 로우터의 최대 허용 진폭 및 최대 허용 제어이득을 구하여 자기 베어링의 작동 안정영역을 검색하므로써 자기 베어링의 설계시 그의 작동성능 한계를 결정하는 인자들의 규명을 수행한다.

2. 최대 자기력

자기 베어링은 전자석 작동기 코어 재료의 비선형적인 자화 특성에 기인하여 최대 자기력의 한계값을 갖는다. $B = \mu_0 \cdot H$ 는 코어의 자속이 자기력과 단순히 비례관계에 있을 때에만 적용되는 식이며, 실제로는 코어 재료의 비선형적인 자화곡선에 지배를 받는다. 코어 재료인 철의 자화곡선⁽⁵⁾에 따르면, 자장

강도(H)가 증가함에 따라 자속(B)이 증가하지만 $B = 1.6$ 테슬라(Tesla) 이상에서는 자장 강도가 증가하여도 자속이 더 이상 증가하지 않는 자속의 포화현상이 발생한다. 그런데, 자속이 1.2 테슬라 이상에서는 자장 강도와 자속 사이의 선형성이 급격히 감소하므로 $B_{max} = 1.2$ 를 전자석 작동기의 한계자속으로 정의한다.

전자석 작동기의 폴 내에서의 최대 자속 Φ_p 는 다음과 같이 주어진다.

$$\Phi_p = B_{max} \cdot A \quad (1)$$

또한 전자석 작동기의 폴과 로우터 사이에 형성된 공기간극 내에서의 최대 자속 Φ_g 는 로우터가 자기 베어링의 중심에 위치했을 때에 다음과 같이 주어진다.

$$\Phi_g = \frac{\mu_0 \cdot N \cdot I_{max} \cdot A}{2 \cdot g_0} \quad (2)$$

위의 두 자속은 동일하므로,

$$N \cdot I_{max} = \frac{2 \cdot g_0 \cdot B_{max}}{\mu_0} \quad (3)$$

수직 방향으로 자기 베어링의 서로 마주보는 두 폴 사이에 로우터가 위치할 때, 로우터에 가해지는 견인자력은 다음과 가타이 주어진다.

$$F_z = \frac{\mu_0 A N^2 \gamma}{4} \cdot \left[\frac{I_B^2}{(g_0 - \gamma z)^2} - \frac{I_T^2}{(g_0 + \gamma z)^2} \right] \quad (4)$$

이 때, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} [Wb/A \cdot turn \cdot m]$ 은 공기간극에서의 투자율이며, $\gamma = \cos(\pi/8)$ 은 진원형 자기 베어링의 로우터 변위 민감도, I_B 및 I_T 는 각각 하부 및 상부 폴에 흐르는 전류이고 g_0 은 자기 베어링과 로우터 사이의 기준간극이다. 그리고 본 논문에서 모델링 된 자기 베어링의 경우 폴의 단면적 $A = 400 \times 10^{-6} [m^2]$, 코일의 권선수 $N = 430$ 이다. 그런데, 식 (4)에서 도출된 견인자력은 가상일의 정리로부터 유도되었으므로 자화계수 M 에 기인한 자기력의 변화를 고려할 수 없을 뿐만 아니라 자속의 누설이나 모서리 효과 등을 고려하지 않았기 때문에 실제로 발생한 견인력과는 오차를 보일 수 있다. Keith 등⁽³⁾은 맥스웰 스트레스 텐서를 사용하여 폴 내부에서의 자속 분포계수인 β_{pole} 을 도입하였으며, 폴 면에서의 자속 누설계수인 α_{leak} 와의 곱으로 견인자력의 이론과 실험상의 차이를 보정하였다.

$$F_{z,corr} = F_z \cdot \alpha_{leak} \cdot \beta_{pole} \quad (5)$$

이 때 보정계수 $\alpha_{leak} \cdot \beta_{pole}$ 은 간극의 함수로 철의 경우

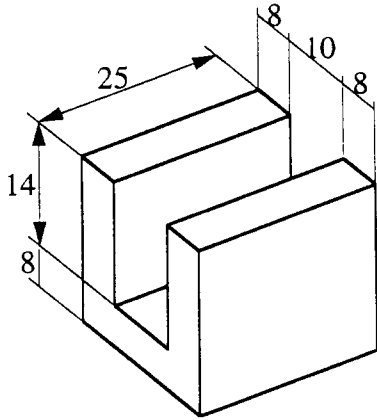


Fig. 1 Dimensions of electromagnet pole

$$a_{leak} \cdot \beta_{pole} = 0.49419 + 0.35452 \exp \left[-(-g_0 - 7.067E-5) / 4E-4 \right] + 0.17726 \exp \left[-(-g_0 - 7.067E-5) / 4E-3 \right] \quad (6)$$

이며 적층된 규소강판의 경우

$$a_{leak} \cdot \beta_{pole} = 0.47554 + 0.36245 \exp \left[-(-g_0 - 6.827E-5) / 3E-4 \right] + 0.18123 \exp \left[-(-g_0 - 6.827E-5) / 3E-3 \right] \quad (7)$$

와 같이 주어진다⁽⁸⁾.

전자석 코일내에 흐르는 전류는 편향전류 성분 I_b 와 교란전류 성분 i_p 의 합으로 구성되며 $i_p = I_b$ 이고 $I_b = 1/2 \cdot I_{max}$ 일 때 자기력은 최대가 된다. 이 값들과 식 (3)을 보정된 견인자력 식 (5)에 대입한 후 $z=0$ 으로 놓으면 전자석 작동기의 최대 자기력 F_{max} 가 구해진다.

$$F_{max} = \frac{a_{leak} \cdot \beta_{pole} \cdot \gamma \cdot B_{max}^2 \cdot A}{\mu_0} \quad (8)$$

그런데, 전자석 작동기의 견인자력은 간극의 함수이므로 최대 자력이 발생할 시점에서의 전류값과 최대 자기력은 전자석 작동기와 견인 대상물 사이의 간극에 따라 변화한다. 이를 검증하기 위하여 Fig. 1과 같은 형상의 말굽형 전자석을 Fig. 2와 같은 견인력 측정장치에 장착하여 간극의 변화에 따른 견인자력의 변화를 측정하였으며 측정결과를 Fig. 3에 도시하였다.

Fig. 3에서 이론적인 결과는 식 (5)에서 도출되었으며 이 그래프의 꺾이는 부분은 자장의 포화현상에 기인한 견인자력의 포화현상을 의미한다. 이론적인 결과에서 자장의 포화에 기인한 견인자력의 한계가

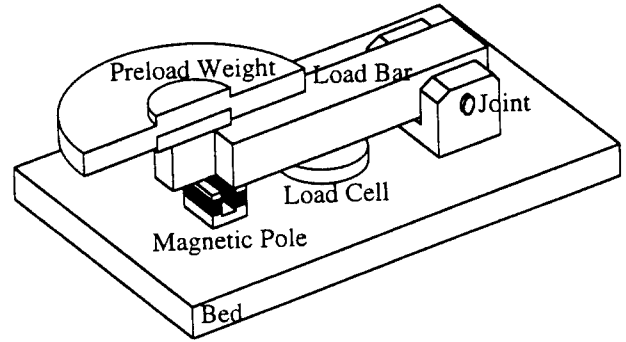


Fig. 2 Magnetic force measuring system

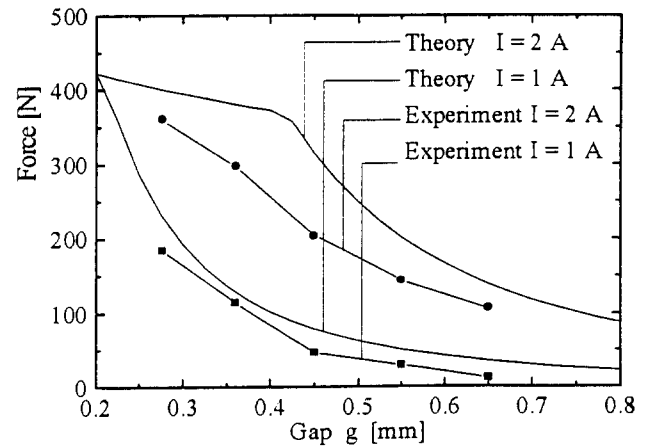


Fig. 3 Magnetic attractive forces for gap variation

간극의 증가에 따라 감소하는 것은 간극의 증가에 따라 자속의 누설이 증가함을 의미한다. 코일전류 $I=1A$ 인 경우의 측정결과는 이론적인 결과보다 약간 작지만 대체적으로 유사한 변화양상을 보이는 반면 $I=2A$ 인 경우는 자속 밀도의 비선형적인 증가특성과 열 발생 등에 기인하여 비교적 큰 차이를 보임을 알 수 있다. 특히, 본 논문에서 코일 재료로 사용한 에나멜 코팅 동선의 경우, 직경 0.35 mm, $N=430$ 인 전자석 작동기에서 약 1.5 A 이상의 전류를 흘리면 코일의 열 발생이 급격히 증가하여 불과 수 분내로 코일이 타버리게 된다.

3. 자기력 변화율

자기력의 변화율은 전자석 코일의 큰 인덕턴스와 자기 베어링 구동용 증폭기에 공급되는 동력원의 전압에 기인하여 제한된다. 로우터가 자기 베어링의 중심에 위치한 경우($z=0$) 자기력 F_z 는 다음과 같이

표현될 수 있다.

$$F_z = K_{iz} \cdot i_p + K_{zz} \cdot z \quad (9)$$

$$K_{iz} = \frac{\mu_0 \cdot A \cdot N^2 \cdot I_0 \cdot \gamma}{g_0^2} \quad (10)$$

$$K_{zz} = \frac{\mu_0 \cdot A \cdot N^2 \cdot I_0^2 \cdot \gamma^2}{2 \cdot g_0^3} \quad (11)$$

로우터의 위치 z 는 베어링의 중심에 위치하며 변위가 매우 작아 무시할 수 있다고 가정하면 교란전류의 시간당 변화율에 의한 자기력의 변화율을 구할 수 있다.

$$\left. \frac{dF_z}{dt} \right|_{z=0} = K_{iz} \cdot \frac{di_p}{dt} \quad (12)$$

제어기로부터 연산된 전압 형태의 제어신호를 전자석 작동기를 구동하는 전류신호로 변환시키는 회로인 전류 증폭기가 Fig. 4에 도시되어 있다. Fig. 4(a)는 전류 증폭기의 실제 회로이며 Fig. 4(b)는 해석을 위하여 전계효과 트랜지스터를 가변 저항기로 이상화시킨 회로이다⁽⁴⁾.

전자석 코일 양단의 전압은 Fig. 4(b)에 따르면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_s = (I_b + i_p) \cdot R_c + L_c \frac{di_p}{dt} \quad (13)$$

전류 조절용 전계효과 트랜지스터(FET)는 이상화된 가변저항처럼 작용하며, 본 연구에서 사용한 IR FIP 150의 경우 최소 저항은 0.25 Ohm이다⁽⁷⁾. 그러므로, 이론상 구현 가능한 최대 자기력 변화율은 다음과 같이 정리된다.

$$\left(\frac{dF_z}{dt} \right)_{\max} < \frac{K_{iz} \cdot [V - (I_b + i_p) \cdot (R_c + 0.25 + R_f)]}{L_c} \quad (14)$$

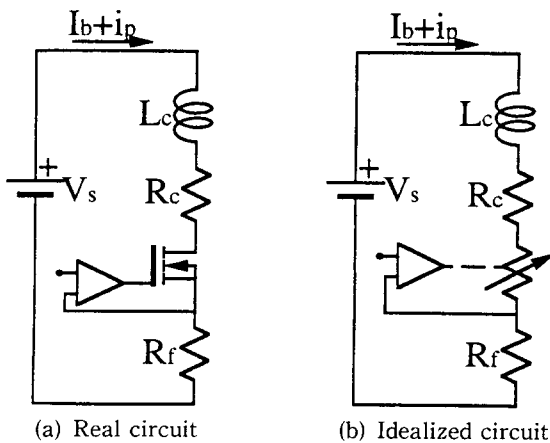


Fig. 4 Current amplifier

최대 자기력 변화율은 자기력이 증가할 때에만 적용되며, 음의 최대 자기력 변화율은 전류 조절용 FET의 음의 항복전압(reverse breakdown voltage)에 의하여 결정되는데, 이 값은 일반적으로 식 (14)보다 크다⁽⁴⁾. 또한 식 (14) 우변의 두 번째 항은 매우 작은 값을 가지기 때문에 최대 자기력 변화율은 결국 베어링의 작동기 이득 K_{iz} , 공급전압 V_s , 코일의 인덕턴스 L_c 에 의하여 결정된다. 코일의 인덕턴스는 다음과 같이 주어진다.

$$L_c = \frac{(N \cdot \Phi)}{I} \quad (15)$$

이 때 I 는 자속 Φ 를 생성하는 데 소요되는 전류이다. 이를 이용하여 자기력 변화율 한계의 상한값을 구할 수 있다.

최대 작동기 이득 $K_{iz,max}$ 는 식 (3)과 식 (10)으로부터 다음과 같이 구해진다.

$$N \cdot I_b = \frac{1}{2} \cdot N \cdot I_{\max} = \frac{g_0 \cdot B_{\max}}{\mu_0} \quad (16)$$

$$K_{iz,max} = \frac{\mu_0 \cdot A \cdot N \cdot \gamma \cdot g_0 \cdot B_{\max}}{g_0^2 \cdot \mu_0} = \frac{A \cdot N \cdot B_{\max} \cdot \gamma}{g_0} \quad (17)$$

그리고 코일의 인덕턴스는 다음과 같이 유도된다.

$$L_c = \frac{N \cdot \Phi_g}{I_{\max}} = \frac{N}{I_{\max}} \cdot \frac{\mu_0 \cdot N \cdot I_{\max} \cdot A}{2 \cdot g_0} = \frac{\mu_0 N^2 \cdot A}{2g_0} \quad (18)$$

그러므로 식 (14)의 K_{iz}/L_c 는 다음과 같이 정리된다.

$$\frac{K_{iz,max}}{L_c} = \frac{A \cdot N \cdot B_{\max} \cdot \gamma}{g_0} \cdot \frac{2g_0}{\mu_0 \cdot N^2 \cdot A} = \frac{2 \cdot B_{\max} \cdot \gamma}{\mu_0 \cdot N} \quad (19)$$

위 식을 이용하면 이론상 구현 가능한 최대 자기력 변화율을 구할 수 있다.

$$\frac{dF_z}{dt} < \frac{2 \cdot \gamma \cdot B_{\max}}{\mu_0 \cdot N} \cdot [V_s - (I_b + i_p) \cdot (R_c + 0.25 + R_f)] \quad (20)$$

이를 이용하여 본 논문에서 사용된 자기 베어링 코일의 경우에 대한 최대 자기력 변화율 한계를 살펴본다.

4. 플랜트의 구성

로우터가 반경 r_0 로 회전하고 있는 경우에 귀환제어 루프에 의해 발생된 자기력의 변화를 기준으로

최대 자기력 및 최대 자기력 변화율 한계에 따른 자기력의 왜곡 현상이 발생하는 회전속도를 살펴보기 위해서는 제어기의 전달함수 모델이 필요하다. 본 절에서는 리드 네트워크를 포함한 간단한 PD 제어기를 모델링하여 귀환제어에 의해 로우터를 지지하는 자기 베어링 시스템에서 로우터의 회전변위에 의해 생성된 자기력의 변화특성을 고찰함으로써 자기 베어링의 작동성능에 영향을 끼치는 인자를 살펴보기로 한다.

본 논문에서 사용된 제어기의 전달함수는 Han⁽⁶⁾의 것을 사용한다.

$$G(s) = \frac{K_T}{\tau_s s + 1} \left[K_p + \frac{K_D \tau_{d2} s}{(\tau_{d1} s + 1)^2} \right] \cdot \frac{s + 1/\tau_c}{s + 1/\tau_d} \quad (21)$$

K_p 와 K_D 는 각각 비례 및 미분이득이며 전달함수의 각 시상수들은 Table 1에서와 같다.

전자석 작동기의 코일에 흐르는 전류인 I_T 및 I_B 는 각각 로우터의 변위에 의존적인 전류인 교란전류 i_p 와 로우터의 변위에 무관한 편향전류 I_b 로 구성되며, 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$\begin{aligned} i_T &= I_b + i_p \\ i_B &= I_b - i_p \end{aligned} \quad (22)$$

교란전류 i_p 는 로우터의 변위와 제어이득의 곱으로 표현된다.

$$i_p(s) = G(s) \cdot Z(s) \quad (23)$$

로우터는 정현함수적인 변위 $z(t) = r_0 \cdot \sin \omega t$ 를 갖는다고 가정하면 교란전류는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} i_p(s) &= \frac{K_T}{1 + \tau_s} \left[K_p + \frac{K_D \tau_{d2} s}{(\tau_{d1} s + 1)^2} \right] \left(\frac{s + 1/\tau_c}{s + 1/\tau_d} \right) \\ &\quad \cdot \left(\frac{r_0 \cdot \omega}{s^2 + \omega^2} \right) \end{aligned} \quad (24)$$

식 (24)를 Mathematica를 이용하여 역라플라스 변환을 수행하면 회전축의 정현함수적인 변위와 제어기의 작동을 고려한 자기 베어링의 시간함수적인 제어전류 $i_p(t)$ 를 구할 수 있다. 역라플라스 변환된 교란전류 식은 지면관계상 생략한다. 이에 따라 시간함수로 표현된 하부 폴의 전인자력은 다음과 같이

주어진다.

$$F_B(t) = \frac{\mu_0 A N^2 \gamma}{4} \left[\frac{(I_b - i_p(t))^2}{(g_0 - \gamma z(t))^2} \right] \quad (25)$$

그리고, 식 (25)를 미분하면 하부 폴의 자기력 변화율 ($dF_B(t)/dt$)를 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{dF_B(t)}{dt} &= \frac{\mu_0 A N^2 \gamma (I_b - i_p(t))}{2} \\ &\quad \cdot \left[\frac{\gamma z'(t) (I_b - i_p(t)) - i_p'(t) (g_0 - \gamma z(t))}{(g_0 - \gamma z(t))^3} \right] \end{aligned} \quad (26)$$

그런데, 교란전류의 시간 변화율 $i_p'(t)$ 는 해석적으로 구하기 어려우므로, 본 연구에서는 유한차분법을 사용하여 구하였다.

$$i_p'(t_n) = \frac{i_p(t_n) - i_p(t_{n-1})}{\Delta t} \quad (27)$$

위 식은 로우터의 회전속도에 의존적인 함수로, 이를 계산하기 위해서, 로우터의 한 회전을 1200개의 차분 요소로 나누어 각 위치에서의 자기력 변화율을 최대값과 비교하며, 자기력 증가시 자기력 변화율이 최대 자기력 변화율보다 큰 경우에는 최대 자기력 변화율을 따라간다고 가정하여 자기력 변화를 계산하였다. 그리고 발생된 자기력이 최대 자기력 한계를 넘어선 경우에는 최대 자기력 값을 따르며, 0보다 작을 때에는 0이라고 가정하였다.

5. 결과의 고찰

최대 자기력 한계와 최대 자기력 변화율 한계는 자기 베어링의 작동영역을 제한하게 되며, 자길 베어링의 설계 변수들과 제어기의 제어 이득에 의존적이다. 자기 베어링에 지지되며 회전하는 로우터의 회전체적을 정현함수로 가정하여 로우터의 진동에 따른 제어기의 귀환제어와 그에 따른 자기 베어링의 자기력의 시간에 따른 변화를 검색하여 최대 자기력 한계 및 최대 자기력 변화율 한계에 기인한 자기력의 왜곡현상의 발생을 검증하였다.

본 연구에서 모델링 된 자기 베어링의 자속의 포화현상에 기인한 최대 자기력 한계는 Fig. 3의 이론적인 곡선을 따른다고 가정하였으며, 이 한계값에 기인하여 자기 베어링의 자기력 왜곡현상이 발생한 경우가 Fig. 5에 도시되어 있다. 이 때의 회전속도는 10,000 rpm이며, 편향전류는 0.3 A로 비교적 낮은 값으로 설정되어 있다. 로우터의 회전반경이 약 34 μm 을 넘어서면 최대 자기력 한계에 기인한 자기력

Table 1 Time constants for analog PD controllers

K_T	3.332	τ_{d2}	2×10^{-3}
τ_s	5×10^{-5}	τ_c	1.67×10^{-4}
τ_{d1}	10^{-4}	τ_d	5×10^{-3}

의 왜곡현상이 발생하기 시작하며 회전진폭의 미소한 증가만으로도 자기력은 완전히 포화현상을 보이게 된다. 그러므로, Fig. 5에서와 같은 사양을 갖는 자기 베어링과 제어기의 경우에는 10,000 rpm에서 로우터에 34 μm 이상의 진동이 발생하면 자기 베어링이 더 이상 로우터를 지지할 수 없게 된다.

최대 자기력 변화율 한계에 기인하여 자길 베어링의 자기력 왜곡이 발생한 경우가 Fig. 6에 도시되어 있다. 해석결과, 본 연구에서 모델링 된 $N=430$ 인 전자석 작동기의 경우는 30,000 rpm 이내에서 여하한 경우에도 왜곡현상이 발생하지 않는다. 그러므로, 전자석 작동기 코일의 인덕턴스가 매우 높은 경우를 가정하여 Fig. 6에서 최대 자기력 변화율 한계에 기인한 자기력의 왜곡현상을 예시하였다. 귀환제어가 수행되는 자기 베어링에서 정현 함수적인 로우터 진동에 따른 자기력 변화율이 최대 자기력 변화율을 넘어서게 되면 자기 베어링의 자기력은 최대

자기력 변화율을 따라 변하게 되어 직선형태로 자기력이 증가하게 된다. 최대 자기력 한계에 기인한 자기력의 왜곡현상은 회전축 지지에 결정적인 영향을 끼치는 반면, 최대 자기력 변화율 한계에 기인한 자기력의 왜곡현상은 부정확한 자기력 생성을 초래하여 로우터의 회전진폭을 증가시키는 결과를 초래한다⁽⁴⁾.

Fig. 5와 Fig. 6에 따르면, 최대 자기력 변화율 한계는 최대 자기력 한계에 비하여 높은 주파수대에 위치하므로 자기 베어링의 작동한계를 결정하는 가장 중요한 인자는 최대 자기력 한계임을 알 수 있다. 본 논문에서 사용된 아날로그 PD 제어기는 로우터의 회전속도 증가에 따라 이득이 지수함수적으로 증가하는 특성⁽⁸⁾을 가지고 있으므로 로우터의 회전속도 증가에 따라 최대 자기력 한계에 기인한 최대 허용 로우터 회전반경을 지수함수적으로 감소하게 된다. 그러므로, 이를 자기 베어링의 안정적인 작동 한계 영역으로 설정하였으며, 각 회전속도에 따라 최대 자기력 한계가 발생하는 로우터의 회전반경을 검색하여 이에 따른 자기 베어링의 작동 안정 영역을 Fig. 7에 도시하였다. 이에 따르면, 최대 허용 진폭은 회전속도에 대하여 지수 함수적으로 감소한다.

제어기의 비레이득 변화에 따른 안정한계 영역이 Fig. 8에 도시되어 있다. 비레이득의 증가에 대한 로우터의 최대 허용 진폭은 지수함수적으로 감소하게 된다. 비레이득은 자기 베어링의 지지강성에 비례하는 성분이므로, 비레이득의 증가는 정상상태에서의 회전축 진폭을 감소시키지만 최대 허용 진폭도 감소시키는 경향을 보인다. 미분 이득의 변화는 자기 베

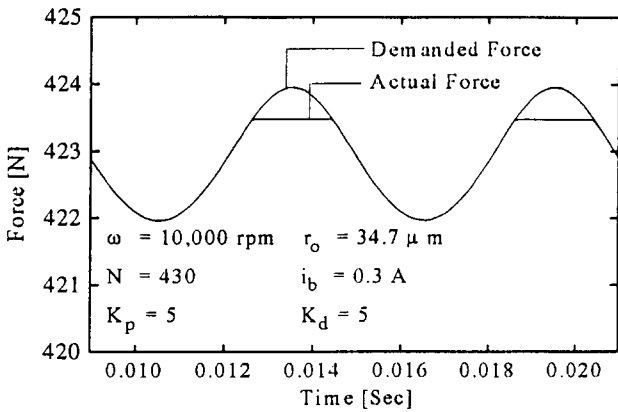


Fig. 5 Distorsion of magnetic force due to the maximum force limit

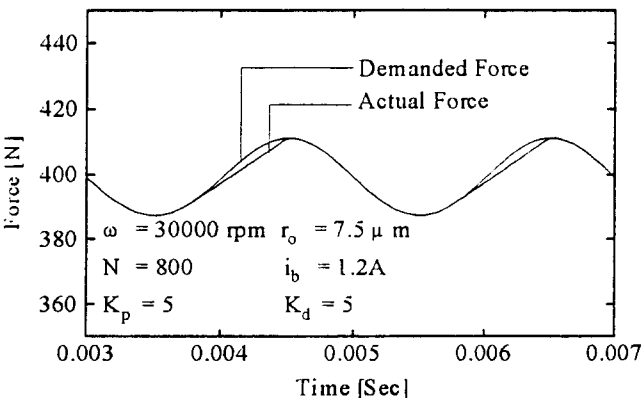


Fig. 6 Distorsion of magnetic force due to the slew rate limit

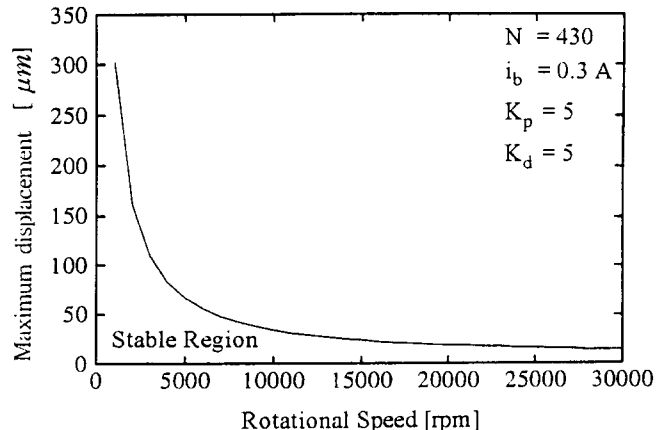


Fig. 7 Stable region of magnetic bearing according to the rotational speed

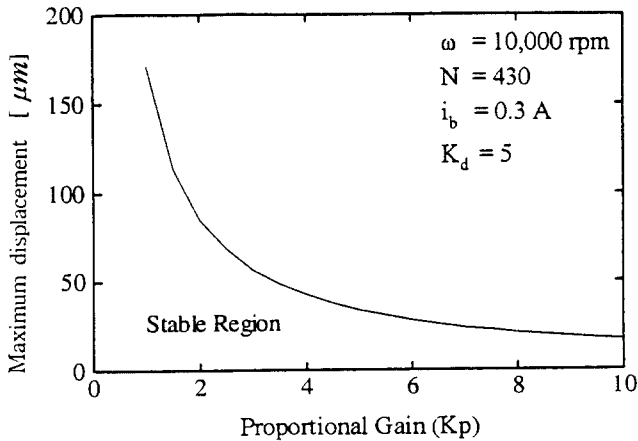


Fig. 8 Stable region of magnetic bearing according to the proportional gain

어링의 안정한계 영역을 감소시키는 경향을 보이지만 안정한계 영역의 감소비율은 비례이득에 비해서는 매우 작기 때문에 결과를 도출하지 않았다.

본 논문에서는 로우터의 운동과 이에 따른 귀환제어가 수행되는 아날로그 PD 제어를 고려하여 자기 베어링의 자기력 생성특성을 고찰하였다. 이에 따르면 로우터의 회전속도 증가에 따라 수반되는 제어기의 귀환제어 이득의 증가는 자기 베어링의 견인력 증가를 초래하며, 전자석 작동기의 최대 자기력 한계에 기인한 자기력의 왜곡현상은 주어진 플랜트 상에서 결국 회전속도와 로우터의 회전진폭에 지배됨을 검증하였다. 이에 반하여 최대 자기력 변화율 한계는 최대 자기력 한계가 발생하는 시점보다 높은 주파수에 위치하므로 결국, 자기 베어링의 작동성능 한계를 결정짓는 주요 인자는 최대 자기력 한계임을 알 수 있다.

6. 결 론

본 논문에서는 회전축의 정현함수적인 변위에 대하여 제어를 고려한 자기 베어링 제어전류의 시간함수적인 변화를 해석함으로써 자기 베어링의 작동한계를 결정하는 요인에 대하여 고찰하였다. 본 연구에서 모델링 된 자기 베어링의 경우, 최대 자기력 변화율 한계에 기인한 자기력의 왜곡현상은 최대 자기력 한계에 기인한 성능한계보다 높은 주파수 영역에 위치하며, 최대 자기력 한계에 기인한 자기력의 왜곡현상은 회전축의 회전속도 및 회전반경과 매우

밀접한 관계가 있다. 그러므로, 본 논문에서는 최대 자기력 한계에 기인한 자기력의 왜곡현상을 기초로 하여 자기 베어링의 작동 안정 영역을 로우터의 최대 허용 회전반경에 대해 회전속도와 제어기 비례이득의 함수로 도출함으로써, 자기 베어링-회전축 계의 설계시 고려해야만 하는 회전축의 공진 설계 및 자기 베어링의 하중지지용량 설계의 기준 제시를 시도하였다.

후 기

본 연구는 한국과학재단지원 터보동력기계연구센터와 G7프로젝트 첨단생산시스템기술개발 연구활동의 일환으로 이루어진 것입니다.

참 고 문 헌

- (1) Imlach, J., Blair, B. J. and Allaire, P. E., 1991, "Measured and Predicted Force and Stiffness Characteristics of Industrial Magnetic Bearing," Trans. ASME. J. of Tribology, Vol. 113.
- (2) Knight, J. D., Zia, Z., McCaul, E. and Hacker, H. Jr., 1992, "Determination of Forces in a Magnetic Bearing Actuator," Trans. ASME. J. of Tribology, Vol. 114.
- (3) Keith, F. J., Williams, R. D. and Maslen, E. H., 1993, "Implicit Flux Feedback Control for Magnetic Bearing," Report No. UVA/643092/MAE93/450, Univ. of Virginia.
- (4) Maslen, E., Hermann, P., Scott, M. and Humphris, R. R., 1989, "Practical Limits to the Performance of Magnetic Bearing," Trans. ASME. J. of Tribology, Vol. 111.
- (5) Kraus, J. D., 1988, "Electromagnetics," McGraw-Hill.
- (6) Han, D. C. and Chang, I. B., 1993, "A Performance of Analog PID Controlled Magnetic Bearing of a Rotor System," Korea-U. S. Vibration Seminar, Taejeon, Korea.
- (7) 1992, "최신 FET 규격표," 성안당.
- (8) 장인배, 1994, "캐패시턴스형 센서가 내장된 자기 베어링의 작동성능 향상에 관한 연구," 공학박사학위논문, 서울대학교.