

능동 자기 베어링 시스템의 설계

하영호*, 김철순**, 이종원**

(Design of Active Magnetic Bearing System)

(Yeong - Ho Ha, Cheol - Soon Kim, Chong - Won Lee)

요약문

전자기 베어링은 기계적 접촉이 없고 전기적 제어가 가능하여 최근 고속 정밀 회전에 사용되고 있다. 본 논문에서는 능동 자기베어링을 모형화하고 제어 이득에 따른 계의 안정성 판별 및 응답특성의 변화를 고찰하였다. 이를 토대로 두개의 반경방향 베어링과 회전체를 제작하고 아날로그 제어회로를 구성하여 안정되게 회전체를 부상시킬 수 있었으며 이로부터 계의 응답특성을 구하였다.

1. 서론

기계적 접촉이나 윤활작용이 없이 전자기력을 이용하여 회전축을 지지한다는 개념은 오래된 것으로 1842년 Earnshaw가 수동형 자기 부상 개념을 도입한 이래 1957년 처음으로 프랑스의 Hispano Suta Company에서 완전 능동 자기부상계(totally active magnetic suspension system)를 완성하였다. 그 후 1970년대까지 Societe Europeene de Propulsion등에서 수동형과 능동형 부상계의 비교연구와, 1970년대 초 NASA에서 인공위성에 관계한 자기부상의 연구등이 이루어졌고, 70년대 중반에는 프랑스 S2M에서 처음으로 전자기 베어링을 이용한 turbomocular pump, electro-spindle 등의 제작에 성공하였다.

전자기 베어링의 장점을 볼 베어링이나 저어널 베어링과 비교하여 크게 두가지로 구분하면 다음과 같다.

가) 기계적인 접촉이 없다.

- 기계적인 마찰, 마모가 없어 에너지 손실이 매우 적고 수명이 반 영구적이다.

- 윤활의 필요성이 제거되어 진공이나 부식성 대기 및 광범위한 온도 범위에서 사용 가능하다.

- 최대 허용속도가 매우 높다.

나) 전기적인 제어가 가능하다.

- 축의 회전을 아주 높은 정밀도로 유지할 수 있고, 질량 불균형(unbalance)에 의한 진동을 감소시킬 수 있다.

- 베어링의 강성계수가 회로내의 제어이득과 관계하므로 자기포화가 되지않는 범위에서 임의로 조절할 수 있고 감쇠(damping)를 조절하여 임계속도 이상으로도 안정된 가속이 가능하다.

최근 회전 기계의 경량화, 정밀화, 고속화가 요구되어 이와 같은 여러가지 장점을 가지고 있는 전자기 베어링에 대한 연구가 활발해져 유럽과 미국, 일본 등에서는 자석재료와 측정장치의 발달과 더불어 고속 정밀 가공기, 터빈, 진공 펌프, 원심 분리기, 모멘텀 휠 등에 전자기 베어링을 이용하는 실용화 단계에 있다.

본 논문에서는 비례 미분제어와 선형 전력 증폭기를 이용한 능동 자기베어링에 대하여 선형화된 지배방정식을 세우고 비례, 미분 이득에 따른 계의 안정성 판별과 응답특성의 변화를 해석적으로 고찰하였다. 이를 토대로 두개의 반경방향 베어링과 회전체를 제작하고 이를 제어하는 아날로그 제어회로를 구성하여 안정되게 회전체를 부상시킬 수 있었으며 몇가지 응답특성을 측정하였다.

* 대우정밀공업주식회사

** 한국과학기술원 기계공학과

2. 전자기 베어링

2.1 전자기 베어링의 설계

능동 전자기 베어링은 자기력의 인력을 이용하는 데 이 경우 인력은 거리의 제곱에 반비례하여 증가하므로 자체적으로 안정된 부상상태를 유지할 수 없다. 따라서 자기베어링-회전체 계를 안정화 시키는 제어기가 필요하게 되며 이는 그림 1에서와 같이 회전체의 위치를 측정하고, 이를 귀환제어기를 통하여 변환한 후, 제어신호를 전력증폭기로 증폭하여 자력을 제어하므로써 회전체를 안정되게 부상시키게 된다.

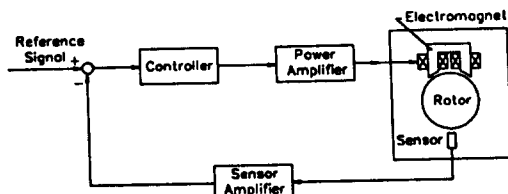


그림 1 전자기 베어링의 제어회로 개략도

가) 전자기 베어링의 구성

완전 능동 전자기 베어링은 보통 2개의 반경방향 베어링과 1개의 축방향 베어링으로 구성되어 축방향 회전운동을 제외한 5자유도 운동을 제어한다. 반경방향 베어링은 전자력을 발생시키는 상하, 좌우 4개의 전자석, 회전축에 고정된 회전원판, 수직, 수평 변위를 측정하는 갭 센서 및 신호증폭기, 정지시나 사고시에 사용되는 보조 베어링, 그리고 각 전자석을 제어하는 제어기 및 전력 증폭기 등으로 구성된다.

나) 전자기 베어링의 설계

전자기 베어링의 설계시 고려사항은 정상상태의 공극 및 전류, 자극 코어의 재질 및 두께, 센서의 위치, 그리고 코일의 감은 횟수 및 자극의 면적 등이 있다.

정상상태의 공극 및 전류는 베어링의 강성계수와 계의 안정성에 영향을 미친다. 공극이 크면 강성계수는 감소하지만 전자석의 자기유도계수도 감소하여 계의 안정성이 높아진다. 반면 전류가 증가하면 강성계수는 증가하며 이에 따라 계가 상대적으로 불안정해진다.

코어의 재질 및 두께는 와전류(eddy current) 손실에 영향을 미쳐 회전원판의 선속도를 제한한다. 와전류 손실을 줄이기 위해서는 얇은 두께의 적층이 요구된다.

코일의 권선수가 증가하면 강성계수와 함께 자기유도계수가 증가하여 계가 불안정하게 된다. 따라서 계의 강성계수와 안정성을 동시에 높이려면 권선수를 줄이고 전류를 증가시키는 것이 좋다.

다) 전자기 베어링의 제원

제작한 전자기 베어링의 제원은 다음과 같으며 코어의 형상은 그림 2와 같다.

• 반경 방향 베어링

자극수 : 8 개, 면적 : $25 \times 30 \text{ mm}^2$

권선수 : 1000 회

코어 : G11 규소강판

두께 : 30 mm (0.35 mm 85매 적층)

내경 : 90.6 mm (공극 0.7 mm)

회전체 외경 : 89.2 mm, 폭 : 30 mm

베어링 중심간 거리 : 166 mm

• 갭 센서

센서 : AEC PU-05, 증폭기 : AEC 5505

측정 범위 : 0 - 2 mm, 분해능 : $0.5 \mu\text{m}$

감도 : 5 V/mm, 주파수 범위 : DC-20 kHz

• 비상 베어링

KBC 6203 zz (축과의 공극 : 0.4 mm)

• 전력 증폭기

증폭율 : 100, 주파수 범위 : DC-20 kHz

Power supply : DC $\pm 40\text{V}$

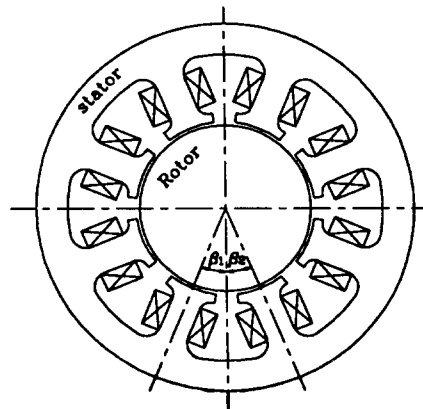


그림 2 전자석 코어의 형상

2.2 전자기베어링의 모형화 및 제어

가) 전자기력의 선형화

회전체의 와전류 손실을 무시하고 자속밀도 (magnetic flux density)가 자기장의 세기에 비례한다고 가정하면 전자석과 회전원판 사이의 공극을 통한 자속밀도 B와 전자기력 F 그리고 자석의 순간자기유도계수 (instaneous magnet inductance) L은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 B &= \frac{\mu_0 N I}{g} \\
 F &= \frac{\mu_0 N^2 I^2 A}{g^2} \dots\dots\dots (1) \\
 L &= \frac{\mu_0 N^2 A}{g}
 \end{aligned}$$

여기서

- N : 코일의 감은 횟수
- A : 한쪽 자극의 단면적
- $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m (진공에서의 투자율)
- g : 총 등가공극 (total air gap)

(1) 식에서 전자기력은 전류의 제곱에 비례하고 공극의 제곱에 반비례하는 비선형성을 보인다. 축이 평형상태에 있을 때의 총공극을 g_0 전류를 I_0 라 하고 변위 q와 제어 전류 i 는 g_0 와 I_0 에 비해 충분히 작은 범위에 있다고 가정하면 변위 q가 발생했을 때 마주 보는 두개의 전자석에 의한 전자기력은 다음과 같이 선형화된다.

$$\begin{aligned}
 g &= g_0 \pm cq \quad (\pm : \text{위/아래 전자석}) \\
 I &= I_0 \pm i \\
 F &= \frac{\mu_0 AN^2}{(g_0 - cq)^2} (I_0 + i)^2 - \frac{\mu_0 AN^2}{(g_0 + cq)^2} (I_0 - i)^2 \\
 &\approx K_i i(t) + K_q q(t)
 \end{aligned}$$

여기서

$$\begin{aligned}
 c &= \cos\beta_1 + \cos\beta_2 \\
 K_i &= \frac{4\mu_0 AN^2}{g_0^2} I_0 \dots\dots\dots (2) \\
 K_q &= \frac{4\mu_0 AN^2 c}{g_0^3} I_0^2
 \end{aligned}$$

그런데 실제 제어 회로에서 전류보다 전압을 제어하기가 쉬우므로 코일에 작용되는 전압 V(t)와 전류 I(t)의 관계식을 구해보면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 V(t) &= R I(t) + \frac{d(LI(t))}{dt} \\
 &= R I(t) + L \frac{dI}{dt} + \frac{\mu_0 c AN^2 I}{g^2} \frac{dq}{dt} \\
 v(t) &= R i(t) + L_0 \frac{di}{dt} + \frac{cK_i}{4} \frac{dq}{dt} \dots\dots\dots (3)
 \end{aligned}$$

여기서 R은 코일의 저항이고 L_0 는 정상상태에서의 자기유도계수이다.

나) 전자기 베어링계의 모형화

회전체를 강체라고 가정하고 두개의 반경방향 베어링이 똑같다고 보면 그림 3과 같이 자기 베어링-회전체계는 3방향 병진 운동과 2방향 회전 운동을 갖는 5 자유도계로 모형화된다.

$$M \ddot{q} + C \dot{q} + K q = B I \dots\dots\dots (4)$$

여기서

$$\begin{aligned}
 q &= \{ x, y, z, \theta_y, \theta_z \}^T \\
 I &= \{ i_x, i_y, i_z, i_d, i_d \}^T \\
 M &= \text{Diag}\{ m, m, m, I_y, I_z \} \\
 K &= \text{Diag}\{ -K_x, -2K_q, -2K_q, -2K_q I_0^2, -2K_q I_0^2 \}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 C &= \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & I_p \Omega \\ 0 & 0 & 0 & -I_p \Omega & 0 \end{pmatrix} \\
 B &= \begin{pmatrix} K_x & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & K_i & K_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_i & K_i \\ 0 & 0 & 0 & K_i I_0 & -K_i I_0 \\ 0 & -K_i I_0 & K_i I_0 & 0 & 0 \end{pmatrix}
 \end{aligned}$$

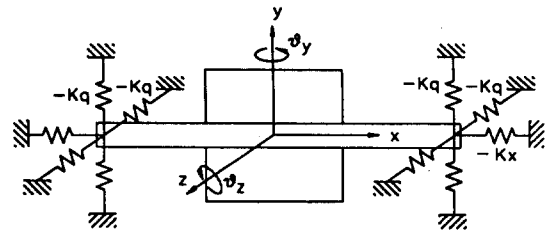


그림 3 전자기 베어링계의 모형

- Ω : 축의 회전 속도
- m : 회전체의 전체 질량
- $2l$: 두 반경방향 베어링 사이의 거리
- I_p : polar mass moment of inertia
- I_d : diametal mass moment of inertia
- K_x, K_i : 전류 강성 계수
- K_x, K_q : 변위 강성 계수

다) 귀환 제어기 설계

앞의 (4)식에서 회전속도에 의한 자이로스코프 효과를 무시하고 다음과 같은 제어전압과 변위의 관계식을 이용하면 5자유도 계가 5개의 1 자유도 계로 변환되어 독립적으로 제어기를 설계할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 y_1 &= y - l\theta_z & y_2 &= y + l\theta_z \\
 z_1 &= z + l\theta_y & z_2 &= z - l\theta_y
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

$$\dot{i}_r = -K_p q_r - K_d \dot{q}_r$$

앞의 (3)식에서 제어전압과 전류의 위상 지연과 크기를 보상하기 위해 전압이득이 K_a 인 증폭기를 사용하고 여기에 이득이 K_b 인 전류귀환제어기를 첨가하면 제어전압 $v(t)$ 와 전자기력 $f(t)$ 사이의 전달 함수는 다음과 같이 된다.

$$\frac{f(s)}{v(s)} = \frac{K_a K_i}{L_o s + (R + K_x K_b)} \tag{6}$$

전체 계에 안정된 제어 회로가 되도록 변위, 속도 귀환을 시키면 전체 계는 그림 4와 같은 블록선도로 나타낼 수 있다. 여기서 K_s 는 센서 이득이고 미분기의 잡음을 줄이기 위해 시상수 τ 인 필터를 첨가하였다.

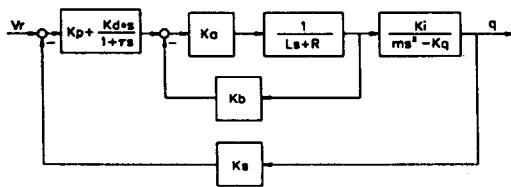


그림 4 전체 계의 블록 선도

2.3 안정성 판별 및 응답 특성

전체 계에서 한 방향의 변위만 고려한 1 자유도 계의 특성 방정식은 다음과 같이 된다.

$$s^4 + a s^3 + b s^2 + c s + d = 0 \tag{7}$$

여기서

$$\begin{aligned}
 a &= \frac{1}{\tau_1} + \frac{1}{\tau} \\
 b &= \frac{1}{\tau_1 \tau} - \frac{K_q}{m} \\
 c &= \frac{K_a K_i K_s}{mL} \left(K_p + \frac{K_d}{\tau} \right) - \frac{K_q}{m} \left(\frac{1}{\tau} + \frac{1}{\tau_1} \right) \\
 d &= \frac{K_a K_i K_s K_p}{mL\tau} - \frac{K_q}{m\tau_1 \tau} \\
 \tau_1 &= \frac{L}{K_x K_b + R}
 \end{aligned}$$

(7)식에 Routh - Hurwitz 안정성 판정법을 적용하여 계의 안정성을 판별해 보면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 K_a K_i K_s K_p &> K_q (K_x K_b + R) \\
 \frac{K_a K_i K_s}{L} \left(K_p + \frac{K_d}{\tau} \right) &> K_q \left(\frac{1}{\tau} + \frac{1}{\tau_1} \right) \\
 \frac{1}{\tau_1 \tau} \left(\frac{1}{\tau_1} + \frac{1}{\tau} \right) &> \frac{K_a K_i K_s}{mL} \left(K_p + \frac{K_d}{\tau} \right) \tag{8} \\
 \left(\frac{K_q}{m} + \frac{1}{\tau_1 \tau} \right) \left(\frac{1}{\tau} + \frac{1}{\tau_1} \right) \left(K_p + \frac{K_d}{\tau} \right) &> \\
 \frac{K_a K_i K_s}{mL} \left(K_p + \frac{K_d}{\tau} \right)^2 + \frac{K_p}{\tau} \left(\frac{1}{\tau_1} + \frac{1}{\tau} \right)^2 &
 \end{aligned}$$

그림 5는 Routh-Hurwitz 판정법에 의한 안정된 영역을 나타낸다. 여기서 보면 정상 상태의 전류가 감소할수록 안정된 영역이 증가함을 볼 수 있다. 그러나 전류가 감소하면 자력이 약해져서 강성계수가 감소하게 되는 단점이 있다.

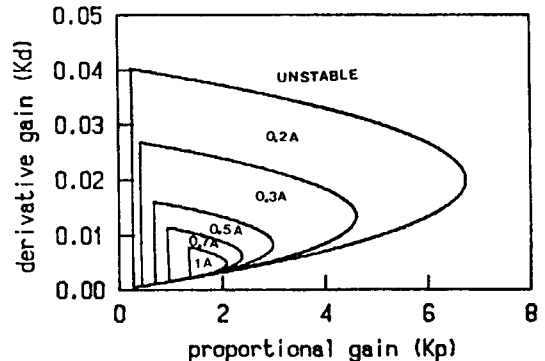


그림 5 Routh-Hurwitz 판정법에 의한 안정 영역

그림 6은 $K_d=0.0023$, $I_o=0.3A$ 일 때 비례이득 K_p 에 따른 근궤적(root locus)을 나타낸 것으로 제어를 하지 않을 경우 양의 근이 하나 존재함을 볼 수 있으며 안정된 영역의 K_p 범위는 0.4와 0.6 사이이다.

그림 7은 $K_p=1.2$, $I_o=0.3A$ 일 때 미분이득 K_d 에 따른 근궤적으로, 미분제어기가 없을 경우 한 쌍의 양의 근이 존재함을 볼 수 있으며 안정된 영역의 K_d 는 0.0019와 0.0253사이이다.

그림 8은 전류 0.3A에서 K_p , K_d 에 따른 단위 계단 응답 특성을 나타낸 것으로 K_p 와 K_d 를 조절함으로써 정상상태 오차를 줄일 수 있으며 과도응답특성을 좋게할 수 있음을 알 수 있다.

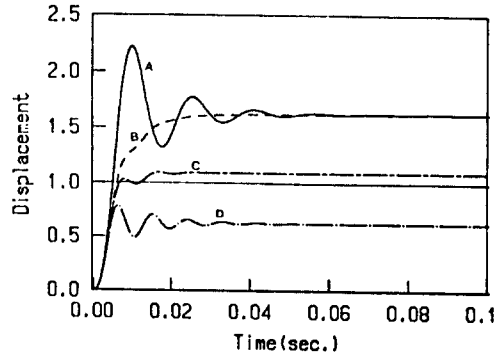


그림 8 단위 계단 응답 특성

A: $K_p=1$, $K_d=0.0023$ B: $K_p=1$, $K_d=0.0047$

C: $K_p=1.3$, $K_d=0.0047$ D: $K_p=2$, $K_d=0.0047$

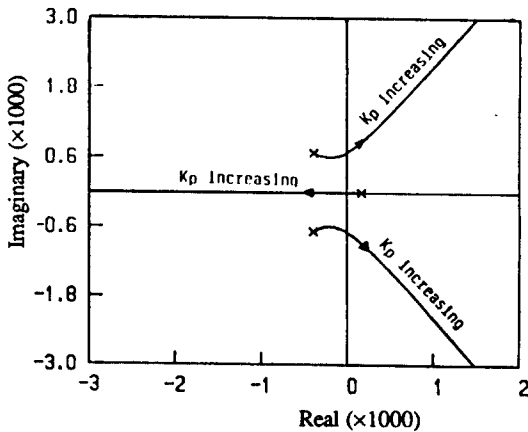


그림 6 비례이득 K_p 에 따른 폐회로의 근궤적
: $K_d=0.0023$, poles : 168.5, $-392.4 \pm j 679$

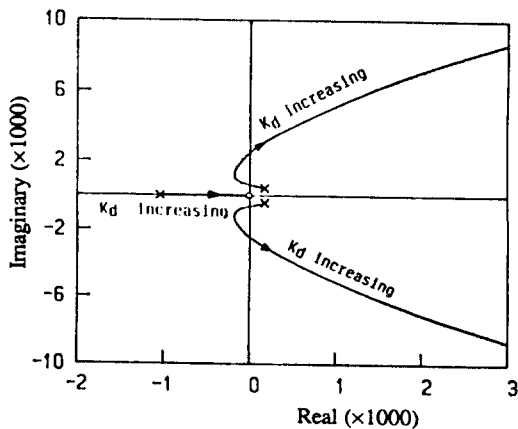


그림 7 미분이득 K_d 에 따른 폐회로의 근궤적
: $K_p=1.2$, poles : -1038, $-176.3 \pm j 427.3$

2.4 전자기 베어링 계의 실험

그림 9와 같이 OP-Amp를 이용한 아날로그 제어회로를 구성하였으며 전자석에 가해지는 전압에 DC 오프셋을 설정하고 여기에 위아래 전자석에 서로 반대부호의 제어 신호를 더하여 전자력을 제어하였다. 그리고 제어이득은 $K_p=1$, $K_d=0.0023$ 으로 하였다.

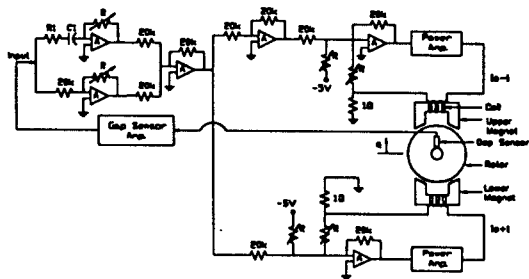


그림 9 전자기 베어링 제어 회로도

그림 10은 정지 상태에서의 반경방향 베어링에서 측정된 전류-자기력 관계로서 이론값과 일치함을 볼 수 있다.

그림 11은 좌/우 자기베어링의 중양에 하중을 가하면서 측정된 변위로 기울기의 역수는 강성계수가 된다. 좌/우측 베어링의 강성계수는 각각 2.84×10^5 , 1.24×10^5 N/m로 계산된다.

그림 12는 단위계단입력에 대한 응답으로 응답이 1.54이고 고유 진동수가 57Hz로 그림 8의 (c)와 유사한 응답특성을 나타내고 있다.

그림 13은 축의 회전상태에서 베어링의 휠을 측정한 것이다.

이상에서 보면 최종적인 축의 위치정밀도는 약간 떨어지나 실제 실험 결과와 해석 결과가 일치하고 있음을 볼 수 있다.

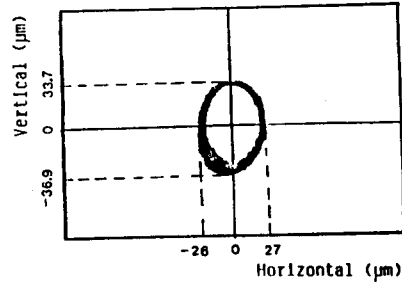


그림 13 베어링의 휠

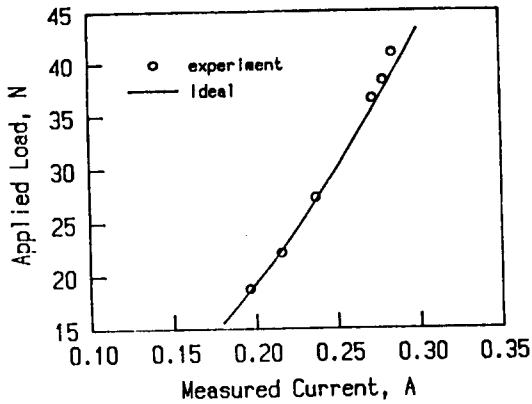


그림 10 전류-자기력 관계도

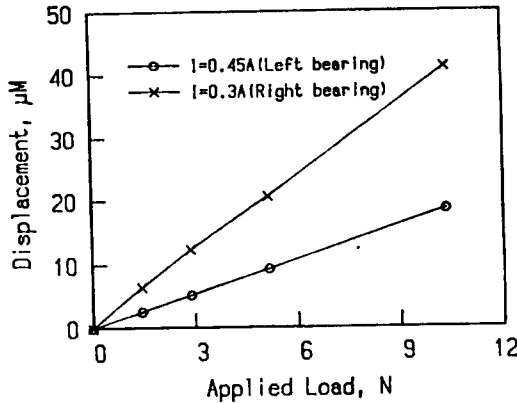


그림 11 수직 방향 하중-변위 관계도

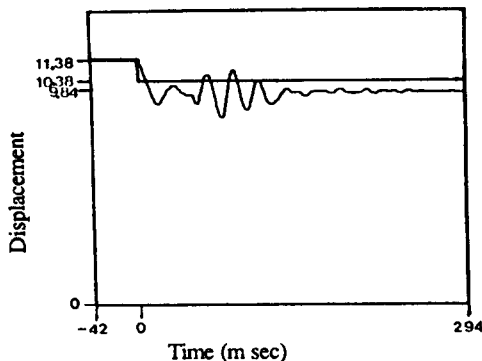


그림 12 단위 계단 입력 응답

3. 결론

2개의 반경 방향 전자기 베어링을 설계, 제작 하였으며 아날로그 제어회로를 이용하여 회전체를 안정되게 부상시킬 수 있었다. 그리고 측정된 자기력과 응답 특성이 이론치와 잘 일치함을 알 수 있었다. 또한 낮은 속도에서는 제어를 독립적으로 설계함이 가능함을 알 수 있으며 큰 이득을 가진 전력 증폭기와 전류 귀환 제어를 이용하여 자기유도계수에 의한 시상수를 크게 줄일 수 있었다.

참고문헌

1. 하영호, "능동 자기 베어링 시스템의 설계," 한국과학기술원 석사학위논문, 1989.
2. 김종선, "전자석 베어링을 이용한 회전체 베어링계의 최적 진동제어," 한국과학기술원 박사학위논문, 1989, 제6장.
3. H. Habermann and G. Liard, "An active magnetic bearing system," Tribology int'l, April 1980, pp85~89.
4. H. Habermann and G. Liard, "Practical magnetic bearing," IEEE spectrum, September 1979, pp 26 ~ 30.
5. M. M. Chen and M. S. Darlow, "Magnetic bearing with rotating force control," Trans. ASME, Journal of Tribology, Vol.110, January 1988, pp 100 ~ 105.
6. R. R. Humphris, R. D. Kelm, D. W. Lewis and P.E. Allaire, "Effect of Control Algorithms on Magnetic Journal Bearing Properties," Trans. ASME, Journal of Eng. for Gas Turbines and Power, Vol.108, October 1986, pp 624 ~ 632.
7. M. A. Plonus, Applied Electromagnetics, McGraw-Hill, Inc., 1988, pp313 ~ 436.