

PID 제어를 이용한 능동형 자기베어링의 설계 및 실험적 동특성 연구

Design and Experimental Study for a Active Magnetic Bearing System by Using PID Control

o 경 진호* 김 종선** 이 해***
 Jin-Ho Kyung Jong-Sun Kim Hae Lee

1. 서 론

자기베어링에 대한 연구는 1800년대 초 부터 미국의 발명가들에 의하여 회전체의 지지, 기계적 마찰 손실 저감, 전기 기기의 효율 개선 등을 목적으로 하여 시작되었다. 그후 1950년경에 수동형과 능동형 자기베어링이 합성된 조합형 자기베어링이 연구되었으며, 1970년대에는 능동형 자기베어링이 상업화되기에 이르렀다. 1980년대 부터 현재에 이르기까지 전기, 전자 분야의 발달과 더불어 이 분야에 대한 연구가 활발히 진행중에 있으며 최근들어 국내에서도 몇몇 대학과 연구소를 중심으로 연구가 시작되고 있다[1-3].

자기베어링은 초고속 밀링, 고진공 펌프, 증기터어빈, 원심압축기 및 각종 터어보기기(turbo machines)등에 사용되며, 현재 그 응용범위가 계속 확장되어가고 있다[4].

자기베어링은 기계적 마찰을 피할 수 있어서 기계의 보수/유지가 거의 필요없고 영구적 수명을 가지며, 윤활이 필요없고, 에너지의 소비도 기존의 접촉식 베어링에 비하여 크게 적다. 회전체의 초고속 회전을 실현시켜주며, 공극이 크므로 열팽창에 대한 적응성이 우수하고 사용 온도 범위(-250°C~450°C)가 넓다. 또한, 고진공 및 기타 오염환경에서도 사용할 수 있다. 베어링의 강성을 조절하여 회전체의 위치를 정확하게 유지시킬 수 있으며 자동 밸런싱(automatic balancing)이 가능하고, 운전중 회전체의 상태(베어링 하중, 속도, 회전체 위치 등)를 온라인으로 모니터링(on-line monitoring)을 할 수 있는 등 많은 장점을 가지고 있다[5].

본 연구에서는 5축 능동형 자기 베어링 시스템에 대한 설계 및 제작 방법을 소개하고 모우드 변수 및 임계속도, 과도 및 정상상태에서의 응답 특성 등 관련 동특성을 실험으로 규명하였다.

* 한국기계연구소 동역학제어연구실

** 금오공대 정밀기계공학과

*** 한국기계연구소

자기베어링 제어방식은 PID 제어를 이용하였고, air jet를 이용하여 회전체를 구동할 수 있도록 실험장치를 구성하였다.

실험을 통하여 안정한 부상특성을 실현하였고, 1,2차의 임계속도를 통과하여 10,000 rpm 이상의 회전속도에서도 안정하게 운전할 수 있었다.

2. 능동형 자기베어링 설계 및 제작

2.1 능동형 자기베어링 설계[3,6,7,8]]

5축 능동형 자기베어링은 반경방향 베어링 2개(각각 상하/좌우 2쌍의 전자석 필요)와 축방향 베어링 1개로 구성되어 있다. Fig. 1에 반경방향 베어링과 축방향 베어링의 구조를 나타내었다. 1 자유도를 제어함에 있어서 2개의 전자석이 필요하며(1개의 전자석 자체로는 불안정하므로) 회전체를 사이에 두고 마주보게 설계하여 상호 흡인력으로 회전체를 제어하게 되도록 한다. 능동형 자기베어링은 부상되는 회전체의 변위를 변위센서로 측정하여 이를 근거로 전자석의 전류를 제어하여 회전체의 위치가 목표위치에 유지되도록 제어하여 준다. 반경방향 베어링은 적층된 박판에 코일을 감아서 제작하게 된다. 박판을 사용하는 이유는 주로 회전체가 고속 회전할 때 발생하는 와전류에 의한 에너지 손실을 방지하기 위함이다. 와전류손은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\text{와전류손}(Pe) = K \cdot f^2 \cdot t^2 \cdot Bm^2 \quad (1)$$

여기서, f = 자속의 주파수
 Bm = 최대의 자속 밀도
 t = 박판의 두께
 k = 비례상수

자기베어링의 박판과 대응하는 회전체에도 같은 목적으로 적층된 박판디스크(lamination disk)를 설치하여야 한다. 축방향 베어링의 경우에는

구조상 자극의 변화가 존재하지 않으므로 박판을 사용할 필요가 없다. 반경방향 제어와 축방향 제어는 완전히 독립되어 있다. 자기베어링의 전자석과 회전체 사이의 공극이 작을 경우 강성계수가 높아져 회전체를 더욱 견고하게 제어할 수 있으나 위치강성계수가 증가하게 되어서 보다는 제어 전류가 요구된다. 공극이 큰 경우에는 제어의 안정성은 높게되나 강성계수가 감소하게 되어 많은 전류 또는 권선수를 필요하게 된다. 현재 실용화되어 사용되고 있는 자기베어링의 공극은 0.2~1.0mm 정도 이다. 회전체의 직경디스크와 자기베어링 사이의 자속(ϕ) 및 1개의 전자석에 대한 인력(F1)은 식(2)와 같이 표현된다.

$$\phi = \frac{\mu ANi}{c} \quad F = \frac{\phi^2}{\mu A} = \frac{\mu AN^2 i^2}{c^2} \quad (2)$$

여기서, N = 다리당 권선수
 C = 공극
 A = 자극면적
 μ = 투자율
 i = 전류

그리고, 회전체의 중심 위치에서 선형화 시킨된 한 쌍의 전자석에 대한 전자기력(F)는 식(3)와 같이 나타낼 수 있다.

$$F = F_{1s} - F_{2s} - k_y \Delta y - k_i \Delta i \quad (3)$$

$$k_y = \frac{-2\mu}{c^3} [A_1 N_1^2 i_{1s}^2 + A_2 N_2^2 i_{2s}^2]$$

$$k_i = \frac{-2\mu}{c^2} [A_1 N_1^2 i_{1s} + A_2 N_2^2 i_{2s}]$$

여기서, 1, 2 : 상부자석, 하부자석 표시
 (or 좌/우 자석표시)
 F_{1s}, F_{2s} : 정상상태의 전자기력
 Δy : 회전체의 변위증분
 Δi : 코일에 흐르는 제어전류 증분

자기베어링이 감당할 수 있는 최대 부하용량(Fmax)은 식(4)와 같다.

$$F_{max} = \frac{B_{max}^2 A}{\mu_0} \quad (4)$$

여기서, Bmax : 최대자속 밀도
 μ_0 : 공기중의 투자율(4 π 10E7 H/m)
 A : 전자석의 극단면적

보통의 규소강에서 최대자속밀도가 1.5T정도이므로

최대부하용량은 1.8 x 10E6A N이 된다. 능동형 자기베어링의 속도한계는 회전체의 원심 강도에 의하여 결정된다. 규소강판을 사용한 반경방향 베어링의 경우 원주속도 200m/sec를 한계로 정하고 있다. 축방향 베어링의 디스크는 고장력강을 사용할 경우 원주속도 400m/sec 까지 가능하게된다. 코일의 권선수를 증가시키면 자기력이 증가하게 되나 자기유도계수도 증가하게 되어 시간지연효과가 발생하여 제어효과를 감소시키게 되므로 양자의 효과를 최대화할 수 있는 최적 권선수 선택이 매우 중요하다. 코일의 발생열에 대한 주요인자는 코일을 감는 방식, 도선의 종류, 절연두께 및 형태, 코일과 베어링을 둘러싸는 매체 사이의 전도/대류 계수, 코일, 보빈, 코아 사이의 전도/대류 계수 등에 관계되어 있다. 회전중 시스템의 이상이나 회전체가 과부하가 걸린 경우에 회전체와 전자석이 접촉되어 파손하지 않도록 보조베어링을 자기베어링에 내장 시켜야 한다. 회전체와 보조베어링 사이의 공극은 주로 자기베어링과 회전체 사이의 공극의 1/2 정도 이다. 전류증폭기는 크게 아날로그 직류증폭기(analog DC amplifier)와 스위칭 증폭기(switching amp.)로 구분된다. 전류증폭기의 성능은 시스템의 주파수 응답을 결정하며, 큰 전류가 필요한 경우 스위칭증폭기를 사용하는 것이 에너지의 손실면에서 유리하다.

능동형 자기베어링 제어기로서 본 연구에서는 리이드(lead) 보상기에 적분제어기를 병렬로 첨가한 아날로그(analog) 제어기를 구성하였다. 실제 회로 구현시, 이 방법은 PID 제어기와 거의 동일한 결과를 주게 된다. 왜냐하면, 비례비분 제어기에 1차의 저주파 여파기(low pass filter)를 부가시킨 것이 리이드 보상기와 동일한 형태와 전달 함수를 갖기 때문이다. 일반적인 1차의 리이드 보상기의 전달함수G(s)는 다음과 같이 표시될 수 있다.

$$G(s) = K \frac{1 + \tau_1 s}{1 + \tau_2 s} \quad (5)$$

여기서, s : Laplace 변수
 τ_1, τ_2 : 시정수
 K : 이득

이는 계에 영점(zero)과 극점(pole)을 배치시키는 것으로, 영점(lead 요소)은 계의 근궤적을 안정한 쪽으로 끌어오는 효과가 있으며, 결과적으로 미분요소와 같은 감쇠효과를 주게 된다. 반면에 극점의 첨가는 계의 안정도를 감소시키는 역할을 하며 일종의 적분 효과와 비슷한 효과를 준다. 적당한 영점과 극점을 배치하여서, 폐회로계의 안정성을 얻도록 설계하는 것이 제어기

설계의 핵심이 된다.

2.2 능동형 자기베어링 제작

본 연구에서 제작된 회전체-자기베어링 시스템의 구성도는 Fig. 2와 같으며, Fig. 3에 실제 모습을 나타내었다. 반경방향 전자석의 코어는 0.35t인 G11 규소강판(규소 3.1~3.3%)을 사용하였고 직경 0.71의 코일을 200번 감아 제작하였다. 제작된 반경방향 전자석의 모습을 Fig. 4에 나타내었다. 회전체와 반경방향 전자석 사이의 공극은 0.6mm로 하였다. 보조베어링으로는 깊은 홈 볼 베어링(KBC 6206)을 사용하였고, 보조베어링과 회전체 사이의 공극은 0.3mm로 정하였다. 축방향베어링은 S45C 철심에 코일을 325번 감아 제작하였다. 전류증폭기는 증폭비가 50배인 아날로그 직류증폭기를 사용하였다. 자기베어링 지지대는 각 베어링사이의 축어긋남(misalignment)을 방지할 수 있도록 일체형(원통형)으로 제작하였다. 자기베어링에 의하여 부상/지지되는 회전체의 구동은 가능한 한 비접촉식 구동이 바람직하다. 비접촉 구동에는 대개 internal motor를 주로 사용하나, 본 연구에서는 air jet를 이용한 구동방법을 도입하였다. Fig. 5에 설치된 air jet 구동부를 나타내었다. 에어 공급 압력은 9 kgf/cm² 으로하였고 속도조절기(유량조절기)를 이용하여 회전체의 회전속도를 가속시킬 수 있도록 하였다. 본 연구에서 사용된 air jet는 최대 0.257 Nm의 토크를 줄 수 있도록 설계하였다. 날개는 폭 15mm, 직경 60mm 알루미늄 디스크에 8개의 홈니 형상으로 제작되었다. 회전체의 변위를 측정하는 변위센서는 50KHz, 1.0mm를 측정할 수 있는 유도형센서를 사용하였고 이득값(Ks)은 317.5μm/V로 정하였다. 회전체는 스테인레스 강(stainless steel)으로 제작하였고, 구조적 특징은 반경방향 베어링을 위하여 양단에 50mm 길이의 규소 작층 디스크가 설치되어 있는 것이다. 회전체의 재원을 Fig. 6에 나타내었다.

3. 실험 연구

제어기는 Fig. 7에 나타난 구성도와 같이 제작하였다. 비레이득(Kc), 미분이득(Kr), 적분이득(Ki)은 각각 3.35, 3.015E-3이며, 시정수 τ_i, τ_d, τ_r는 각각 0.001sec, 0.0001sec, 1sec, 5.1E-5sec로 정하였다.

자기베어링에 의한 회전체의 부상특성을 실험하였다. 반경방향 베어링#1에 대한 실험결과를 Fig. 8(a)에 #2 베어링의 경우를 Fig. 8(b)에 나타내었다(베어링#1, #2를 Fig. 3에 표시하였다). 두 경우 모두 underdamped 특성을 보였다.

#1의 경우 피센트오우버슈트(% overshoot)는 34.3이었고, 감쇠비(ζ)는 0.32이고, #2의 경우 피센트오우버슈트는 29.7이고, 감쇠비는 0.29이었다.

실험으로 베어링#2에 대한 유효강성도(effective stiffness)와 댐핑(damping)을 구하였다. 유효강성도는 0.42E6 N/m이었고, 유효댐핑은 65.64 Nsec/m이었다.

부상된 회전체 시스템에 대한 충격실험을 수행하여 고유값을 측정하였다. 실험결과를 Fig. 9에 나타내었다. 2개의 강체 모드(1차병진 모드: 45.5Hz, 2차 코니컬 모드(conical mode): 81.5Hz)와 1차 유연모드(760Hz)를 규명하였다.

자기베어링에 대한 계단응답실험과 충격응답실험을 수행하여 폐회로계의 과도응답특성을 조사하였다. 미분이득(Kr = Ki(τ_i - τ_d))의 크기에 따른 계의 과도응답특성을 보이기 위해 우선 비레이득(Kc)을 3.35로 고정시킨 후, 미분이득(Kr)을 1.34E-3, 3.01E-3, 7.03E-3으로 바꾸어 가면서 베어링#2의 계단응답특성과 충격응답특성을 실험으로 구하였다. Fig. 10에 각각의 결과를 나타내었다. 미분이득의 증가로 감쇠력이 증가하게 되어서 응답특성은 오우버슈트 양이 감소하면서 빠른시간내에 정상상태에 도달되는 것을 볼 수 있었다. 또한, 비레이득의 변화에 따른 응답특성을 조사하기 위해 미분이득을 3.01E-3로 고정시키고, 비레이득을 1.35, 3.35, 5.6으로 바꾸어 특성을 조사하기 위해 미분이득을 3.01E-3로 고정시키고, 비레이득을 1.35, 3.35, 5.6으로 바꾸어 가면서 실험하였다. 이 경우 계단응답실험과 충격응답실험의 결과가 각각 그림 11(a), (b)에 나타나 있다. 비레이득이 증가하는 경우 응답의 크기가 감소하고 고유진동수가 증가하는 것을 볼 수 있었고, 이것으로 시스템의 강성도가 증가하는 것을 규명할 수 있었다. 반면에 감쇠특성이 감소하는 것도 확인할 수 있었다. 입력된 계단응답양은 0.5 Volt (110μm 변위입력효과)이었다.

제어기의 설계에 있어서, 과도응답특성 뿐만 아니라, 정상상태에서의 정확도도 중요하다. 적분제어를 통하여 이러한 정확도를 구현할 수 있다. 비레이득, 미분이득을 각각 3.35, 3.015E-3으로 고정시킨후, 적분이득을 0, 0.5, 1, 10으로 놓은 상태에서 0.5Volt (110μm 변위 입력효과)에 대한 응답특성을 실험하였다. Fig. 12에 그 결과를 나타내었다. 적분이득이 증가하면서 계의 강성도가 증가하여 감쇠율은 감소하나 일정한 외란에 대한 오차가 감소함을 알 수 있었다.

운전중의 자기베어링 시스템의 동특성을 보기 위해 air jet 구동으로 10,000rpm까지 회전시키면서 실험을 수행하였으며, 변위센서로 배어

링#1과 베어링#2의 상/하방향응답과 선회궤적(whirl orbit)을 측정하였다. 그 결과를 Fig. 13에 나타내었다. 충격실험에서 구한 고유값과 실험에 의한 임계속도가 근사하게 접근하였다. 강제 모우드의 경우 감쇠가 비교적 크기 때문에 임계속도를 쉽게 통과할 수 있었다. 1차 임계속도에서는 베어링#1의 진폭이 베어링#2의 진폭에 비하여 약간 크지만 감쇠가 크기 때문에 진폭의 크기가 비교적 작게 되고, 2차의 임계속도에서는 베어링 #2의 진폭이 상당히 크다. 이는 1차 모우드의 경우 노드(node)점이 베어링#2에, 2차 모우드의 경우 베어링#1에 근접해 있기 때문이다. 선회궤적의 결과를 보면 수평 방향의 강성도가 수직 방향의 강성도 보다 작아서 비대칭 특성을 보이는 것을 관찰할 수 있다.

4. 결론

5축 전방향능동자기베어링 시스템을 설계/제작하였고 동특성실험을 수행하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 충격응답 실험 및 계단 응답 실험을 통하여 자기베어링 시스템의 과도응답 특성을 연구하였고, 비레이득, 미분이득, 적분이득의 변화에 따른 계의 동특성 변화를 실험하였다. 실험결과 비레이득은 계의 강성도, 미분이득은 감쇠특성을 향상시키고 적분이득의 증가는 정상상태에서의 오차를 감소시키는 작용을 하였다.

2. 위 실험에서의 결과 적당한 PID이득을 결정하였고 이 제어기를 이용하여 운전중의 회전체의 동특성 실험 결과, 1,2차 임계속도를 과도한 진동없이 통과하여 운전할 수 있었다.

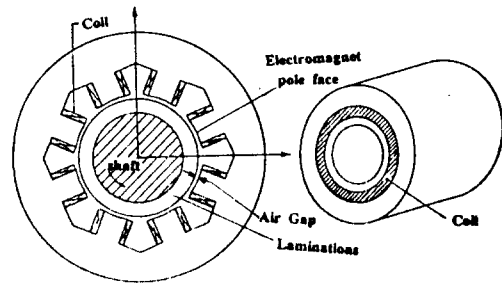
3. Air-jet를 이용한 비접촉구동을 실현하여 회전체를 10,000 rpm 이상 회전시켜 실험을 수행하였으며 매우 작은 구동력(0.257 Nm)으로도 높은 회전수를 얻을 수 있었다.

참 고 문 헌

1. H.J.Moses, F.D.Pinckney and D.A.Weise, "Magnetic Bearing Turbomachinery Operating Experience", First International Symposium on Magnetic Bearing, June 6-8, 1988
2. 김 철순, 하 영호, 이 종원, "능동자기 베어링 시스템의 설계" 한국소음진동공학회 추계학술대회, 1990
3. 경 진호, 이 유진, 이 해 "초고속 회전로타의 동특성에 관한 실험적 연구" 과학기술처, UCN24-1368, C
4. M.Brunet, "Practical Applications of the Active Magnetic Bearings to the Industrial

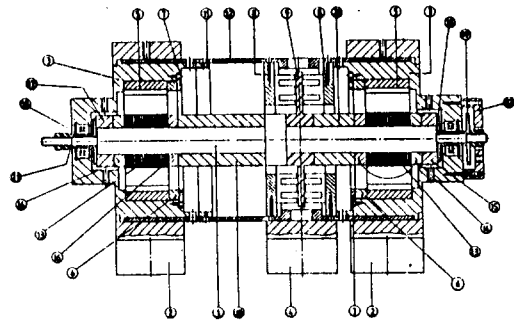
World", First International Symposium on Magnetic Bearing, June 6~8, 1988

5. M.Brunet, "Contribution of Active Magnetic Bearings Spindles to Very High Speed Machining", Vernon, France
6. G.Schweitzer, A.Traxler, "Design of Magnetic Bearings", Switzerland, 1985
7. R.D.Kelm, R.R.Humphris, P.E.Allaire, "Analysis and Testing of a Magnetic Bearing For Flexible Rotors", UVA 1630921 MAE 861344, June 1986
8. M.E.F.Kasarda, P.E.Allaire, R.R.Humphris and B.A.Barret, "A Magnetic Damper for First Mode Vibration Reduction in Multimass Flexible Rotors" Transaction of the ASME, 89-GT-213, 1989



(a) Radial bearing (b) Thrust bearing

Figure 1 Structures of a magnetic bearing



5 : Radial bearing 8 : Thrust bearing

Figure 2 Assembly of the prototype of a magnetic bearing system.

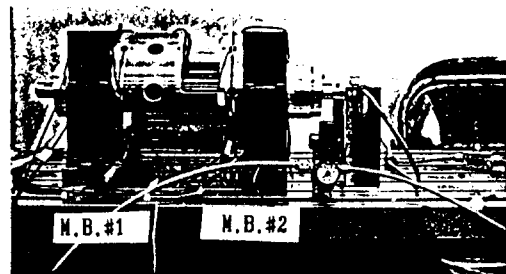


Figure 3 Side view of the prototype

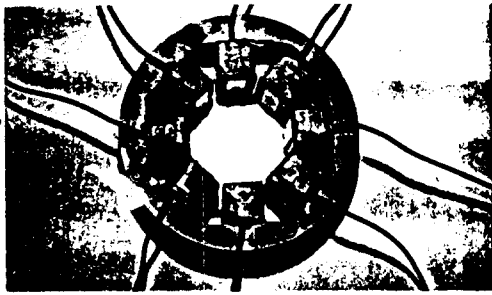


Figure 4 Radial magnet

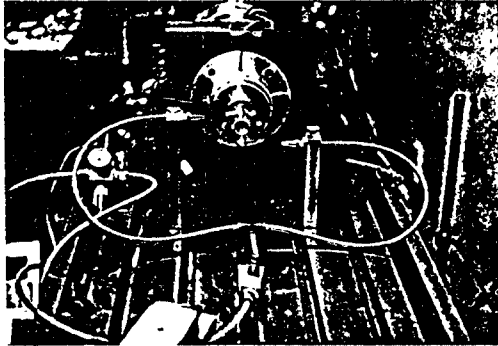


Figure 5 Air-jet drive system

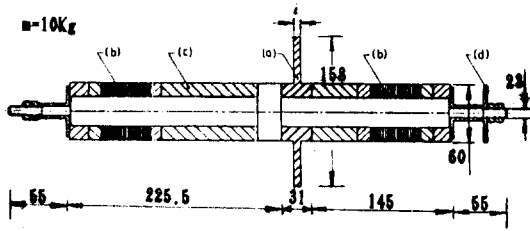


Figure 6 dimension of the rotor

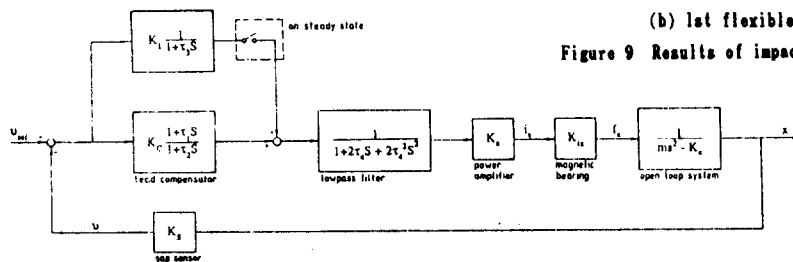


Figure 7 Block diagram of the control system

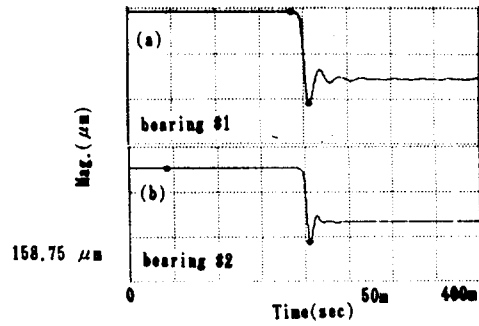
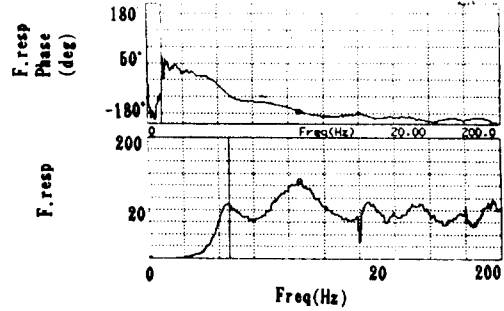
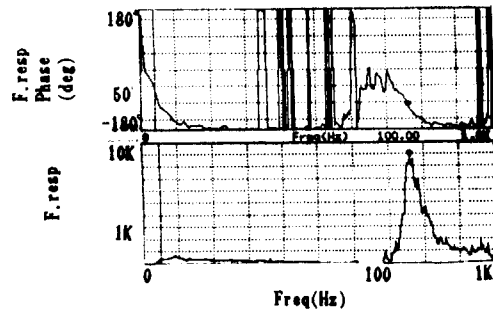


Figure 8 Lifting property of magnetic bearings

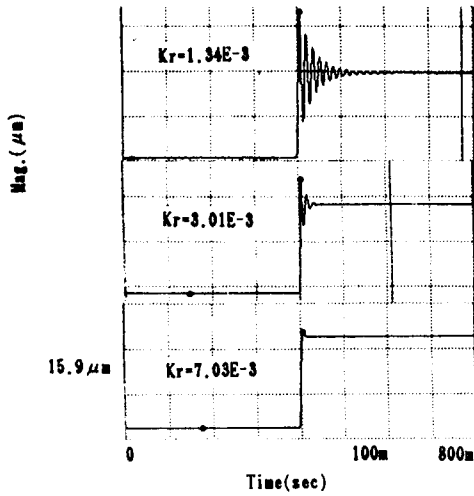


(a) Rigid modes(45.5Hz, 81.5Hz)

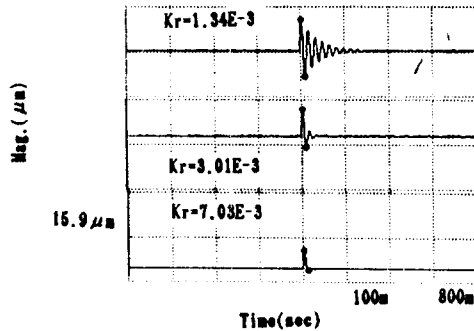


(b) 1st flexible mode(760Hz)

Figure 9 Results of impact tests

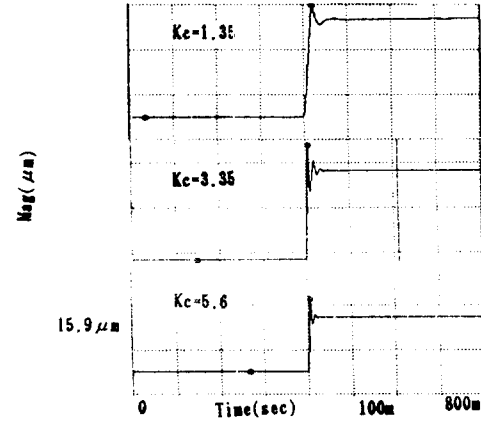


(a) Step response

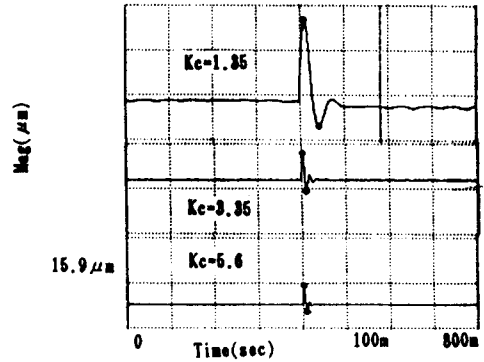


(b) Impulse response

Figure 10 Experimental response for various values of K_r with $K_c = 3.35$



(a) Step response



(b) Impulse response

Figure 11 Experimental response for various values of K_c with $K_r = 3.01E-3$

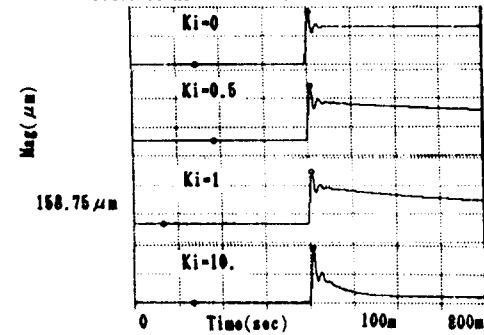
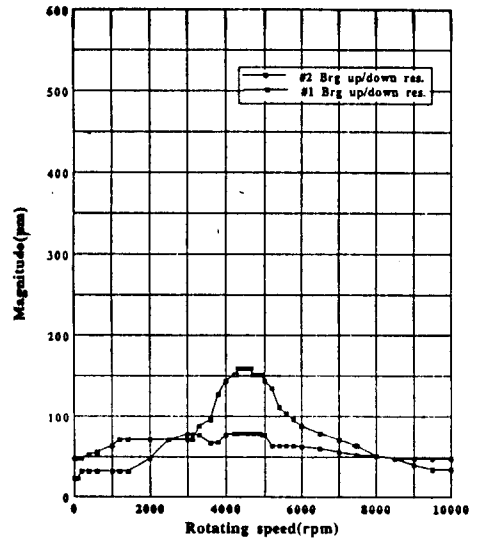
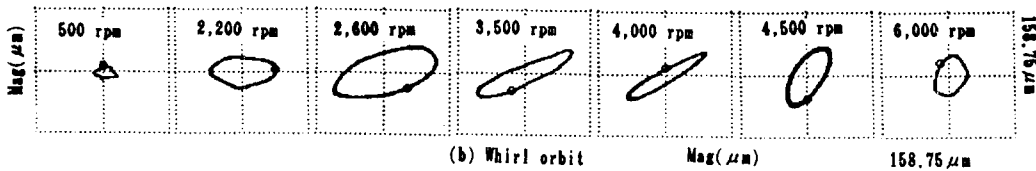


Figure 12 Experimental step response for various values of K_i with $K_r = 3.01E-3$, $K_c = 3.35$



(a) Vibration responses (up/down) of bearing #1, #2



(b) Whirl orbit

Figure 13 Experimental vibration responses for various rotating speeds

• 요약문

본 연구에서는 5축 능동형 자기 베어링 시스템을 설계, 제작하였고, 모우드 변수 및 임계속도, 과도 및 정상상태에서의 응답특성 등 관련 동특성을 실험으로 규명하였다. 자기베어링 제어방식으로는 PID 제어를 도입하였고, air jet를 이용하여 회전체를 비접촉으로 구동(구동력: 0.257 Nm)할 수 있도록 실험장치를 구성하였다.

충격응답 실험 및 계단 응답 실험을 통하여 자기베어링 시스템의 과도응답 특성을 연구하였고, 비레이득, 미분이득, 적분이득의 변화에 따른 계의 동특성 변화를 실험하였다. 실험결과 비레이득은 계의 강성도, 미분이득은 감쇠특성을 향상시키고 적분이득의 증가는 정상상태에서의 오차를 감소시키는 작용을 하였다. 이러한 실험을 통하여 결정된 PID이득을 이용하여 회전체가 1,2차 임계속도를 과도한 진동없이 통과하여 운전할 수 있도록 하였다. Air-jet를 이용한 비접촉구동을 통하여 회전체를 10,000 rpm 이상 회전시켜 실험을 수행하였으며 매우 작은 구동력(0.257 Nm)으로도 높은 회전수를 얻을 수 있었다.

• 발표내용

1. 서론

- 자기베어링역사
- 자기베어링 시스템의 사용에 및 장점
- 본 연구내용 설명

2. 능동형 자기베어링 설계 및 제작

- 능동형 자기베어링 설계방법
- 능동형 자기베어링 제작

3. 실험 연구

- 부상특성
- Effective stiffness, damping
- Impact test
- 과도응답 특성실험
- 진동응답실험(진동응답, 선회궤적)

4. 결론