

지능형 마그네틱 베어링

하영호 · 이종원

Intelligent Active Magnetic Bearings

Young-Ho Ha and Chang-Won Lee



- 하영호(대우정밀 기술연구소)
- 1960년생
- 진동제어를 전공하고 있으며, 마그네틱 베어링의 설계 및 제어에 관심이 있다.



- 이종원(한국과학기술원 기계공학과)
- 1948년생
- 회전체 역학, 신호처리, 자동제어 등을 강의하고 있으며, 회전기계, 정밀기계 등의 진동해석 및 제어에 관심을 가지고 있다.

1. 머리말

마그네틱 베어링은 磁力을 이용하여 물체를 비접촉으로 지지하는 베어링으로, 종래의 베어링으로는 실현이 불가능한 기능과 성능을 가지며 자기력의 이용 방법에 따라 표 1과 같이 분류할 수 있다.⁽¹⁾ 또한 마그네틱 베어링은 회전축을 비접촉으로 지지하므로 기계적 마찰 및 마멸이 없고 밀봉의 필요성이 없기 때문에 진공이나 부식성 대기 및 광범위한 온도 범위에서 사용이 가능하며, 전기적 제어에 의해 베어링의 강성 및 감쇠를 조절할 수 있으며 축의 높은 回轉精度 및 자동 밸런싱이 가능할 뿐만 아니라, 동작 기계에 있어서 기계를 운전하는 동안 공구 마멸에 대한 모상과 동작 상태를 감시할 수 있다.⁽²⁻⁴⁾ 특히 능동형 마그네틱 베어링은 부하능력과 감쇠효과가 크고 신뢰도가 높으며 제어가 쉬우므로 최근 급속도로 발전하고 있으며, 표 2는 능동 자기 베어링의 특징을 나타내고 있다. 그림 1은 능동형 마그네틱 베어링의 작동 원리를 나타낸 것으로 기준값으

로부터의 축의 편차 신호를 측정하여 제환 제어에 의해 회전축의 상하에 배치된 한 쌍의 전자석 여자코일에 흐르는 전류를 제어하여 회전축을 지지한다. 즉 회전축이 위쪽으로 이동하면 변위센서에 의해 변위를 검출하고 제어기에서 신호처리를 하여 전력 증폭기에서 전류를 증폭한 후 아래쪽의 전자석의 여자전류는 증가시키고 위쪽 전자석의 여자전류는 감소시켜 회전축을 복원시킨다.^(2,3,5,6)

표 1 마그네틱 베어링의 부상 방법

종류	원리	응용
리럭턴스 (reluctance) 힘 이용	투자성이 다른 재료에 수직으로 작용하는 전자기력 이용	AMB, 수동·능동 복합형 베어링
		Tuned LC 베어링
		초전도체 베어링, Diamagnetic MB
로렌쯔 힘 이용	자속선에 수직으로 작용하는 전동력 이용	교류 베어링 Bearingless 모터 전동력 수동 부상 베어링

표 2 능동 마그네틱 베어링의 특징

특징	비고	
無접촉		
無윤활/無마멸	진공, 청정, 무균 환경 및 활성, 순수 매체의 수송에 적합	
고속 운전	350 m/s 최대속도 (회전체 재료 강도가 한계)	
無실		
장점	低 베어링 손실	기존 베어링의 1/5~1/20 수준
	低유지비 및 고수명	
	비교적 높은 베어링 하중	20~80 N/cm ²
	가변 동강성계수	안정성 향상
	정밀 구동	~1 μm
	자기(self)제어 및 온라인 진단기능	신뢰도 향상
	in-situ 시스템 규명	
	고가	
단점	복잡한 시스템	기술 안정화 필요
	현장 지식 부족	
	급속한 기술개발 속도	
	안전도 및 신뢰도 인식부족	

1842년 Earnshaw가 수동형 요소만으로는 안정된 부상을 할 수 없다는 수동형 자기부상의 개념을 도입한 후, 1930년대 중반 이후 미국의 Beams는 원심분리기의 축방향 베어링을 최초로 능동제어 하였으며 1957년 프랑스의 Hispano-Suiza Co.에서는 완전 능동 마그네틱 베어링에 대한 특허를 제출하였다.^(2,3) 1976년 프랑스에서는 전문적인 마그

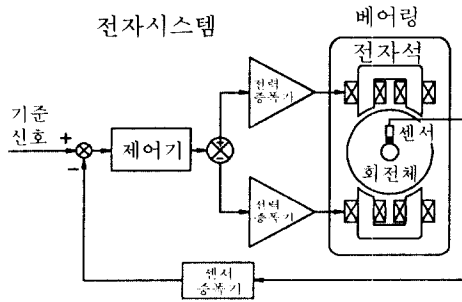


그림 1 능동형 마그네틱 베어링의 작동원리

네틱 베어링의 제조 및 판매를 위해 S2M사가 설립되었고, 1980년대에는 미국과 일본에 S2M사의 합작회사인 MBI와 JMB가 각각 설립되었으며, 일본의 NTN 東洋 베어링, 세이코 精機 등 많은 회사에서 마그네틱 베어링 개발에 대한 연구가 진행되어 연삭기, 진공펌프, 그리고 원심분리기 등에 마그네틱 베어링을 응용한 제품이 상품화되었다. 80년대 이후에는 저손실, 저가 마그네틱 베어링, 소형 마그네틱 베어링, 그리고 고하중 마그네틱 베어링에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있으며, 초기의 고정정, 고정공 분야 및 우주항공 분야의 응용에서 터빈, 펌프, 동작기계, 로봇, 플라이휠 등 산업적 응용이 확대되고 있다.

2. 국내외 연구동향 및 응용 추세

2.1 국내 연구 동향

국내의 마그네틱 베어링에 대한 연구는 1980년 초 KIST에서 연구가 시작되어 1990년대 들어 대한기계학회지에 마그네틱 베어링을 소개하는 글이 게재되었고,⁽⁷⁾ 대학과 연구소를 중심으로 관심이 증가되고 있으나 그림 2에 나타난 것처럼 선진국에 비하면 아직 미미한 상태이다. 1980년 KIST에서 초고속 회전체 에너지 저장장치용으로 반경방향에 수동형 마그네틱 베어링 그리고 축방향

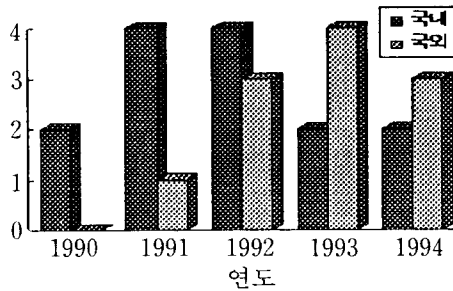


그림 2 마그네틱 베어링 관련 국내외 학술지 및 학술대회에 발표된 논문 편수

에 능동형 마그네틱 베어링을 적용하기 위한 기초연구를 수행한 후, 1982년 외부 구동 5축 마그네틱 베어링에 의해 3.3 kg의 회전축을 11,500 rpm의 속도로 운전하는데 성공하였다.⁽⁸⁾

2.1.1 한국과학기술원 소음 및 진동 제어 연구 센터

1980년대 중반 이후 탄성 회전체 베어링계의 진동제어에 마그네틱 베어링을 이용하였으며,⁽⁹⁾ 1988년에는 외부 구동 4축 마그네틱 베어링을 개발하였다.⁽³⁾ 1990년에 모터와 마그네틱 베어링이 일체로 된 내부구동 마그네틱 베어링을 개발하여 15 μ m의 회전 정도로 12,000 rpm으로 운전하였으며,⁽⁶⁾ 1991년에는 로봇 관절용으로 두 개의 원추형 마그네틱 베어링과 토크 모터를 내장한 5자유도 원추형 마그네틱 베어링 시스템을 개발하여 3 μ m 이하의 회전 정도로 운전하였다.⁽¹⁰⁾ 또한 DSP를 이용한 디지털 제어에 의해 회전 정도 1~2 μ m인 마그네틱 베어링을 이용한 스피들을 개발하였으며 이 시스템은 직경 80 mm의 회전축을 30,000 rpm 이상으로 운전할 수 있다. 정밀한 베어링 시스템을 구현하기 위해 마그네틱 베어링의 등방제어 및 측정부분의 RUNOUT 제거 알고리즘을 개발하였으며, 최근에는 전자기 베어링에 압전형 하중계를 내장시킨 하중계내장 마그네틱 베

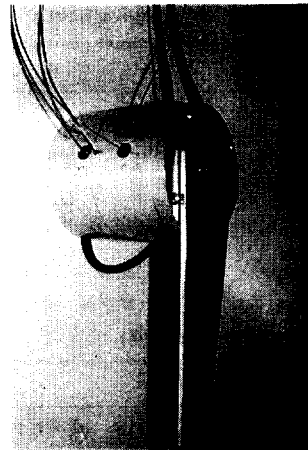


그림 3 KAIST의 로봇 관절용 원추형 마그네틱 베어링

어링 시스템에 의한 시스템의 매개변수 규명, 자기진단 및 처치를 위한 연구가 진행 중이다.^(11,12) 그리고 반송과 전류 신호를 이용하여 변위 센서 없이 1축 마그네틱 베어링의 제어에 성공하여 높은 정도를 필요로 하지 않는 소형 마그네틱 베어링을 적은 비용으로 구현할 수 있게 되었다.⁽¹³⁾

2.1.2 서울대학교 기계설계학과

1990년에 아날로그 제어에 의한 4축 외부 구동 마그네틱 베어링을 유연 회전축의 진동 제어에 적용하여 1차 공진에서 40 μ m, 최소 5 μ m 정도의 진폭으로 제어하였고, 1993년에는 자체 제작한 Plate Type Capacitance 센서를 이용한 아날로그 PID제어 4축 외부 구동 마그네틱 베어링을 회전 정도 40 μ m 이하로 15,000 rpm까지 운전하였다. 이 연구실에서는 센서 Plate, 센서 증폭기 그리고 센서 제어를 자체 개발하였다.⁽¹⁴⁾

2.1.3 기계연구원 및 한국항공대학교

1990년부터 학연 협동에 의해 PID 제어 5

축 마그네틱 베어링을 공기 터빈에 의해 20,000 rpm까지 운전하였고,⁽¹⁵⁾ PID 퍼지 제어 알고리즘과 노치 필터를 이용한 자동 밸런싱 알고리즘을 DSP에 의한 디지털제어로 구현하여 성능을 개선하였으며 내부구동 모터에 의해 30,000 rpm의 회전 실험을 하였다.⁽¹⁶⁾ 현재 에너지 보존 장치 시스템에 마그네틱

베어링을 적용하는 연구를 수행중이다.

2.1.4 기타

한국과학기술원 정밀공학과에서 1990년부터 마그네틱 베어링을 연구하여 왔으며 1993년에는 디지털제어 5축 마그네틱 베어링을 공기 터빈으로 운전하였다. 연세대학교 기계공학과에서는 1991년 외부구동 4축 마그네틱 베어링을 제작하여 17,000 rpm에서 10 μm의 회전 정도로 운전하였으며,⁽¹⁷⁾ 1992년과 1993년에는 마그네틱 베어링을 이용한 진동제어⁽¹⁸⁾와 와전류식 마그네틱 베어링에 대한 연구를 하였다. 그리고 원자력연구소에서 1991년 이트륨(Y)계 고온 초전도체를 이용한 마그네틱 베어링을 개발하여 에어 코일의 연속적인 자화에 의한 축의 구동으로 75,000 rpm 이상의 회전속도를 얻었으며,⁽¹⁹⁾ 한양 대학교 기계설계학과에서는 1992년부터 마그네틱 베어링에 대한 연구를 시작하여 아날로그 PID 제어에서⁽²⁰⁾ 디지털 제어를 위한 연구가 진행중이고 삼성종합기술원에서도 마그네틱 베어링에 대한 연구를 해오고 있다.

표 3 능형 능동 자기 베어링의 개발 및 연구추

분야	연구/개발 과제
역학	비상 베어링과의 접촉 운동 문제
	고속 회전체 역학
센서 및 액추에이터	無센서 AMB
	간접측정 : Hall 소자를 이용
	센서 및 액추에이터의 통합(Sentuator)
	신뢰도 향상을 위한 잉여 센서 및 액추에이터 운용
	광학식 변위 센서 이용
제어	자기 감지 베어링(Self-sensing MB)
	자기시스템 규명 (Self-identification)
	자기 처치 제어 (Self-configuration)
증폭기	Smart Power Electronics
시스템	진단, 신뢰도, 안전도 문제
	고도 모니터링/운용 시스템과의 인터페이스
	가격 절감을 위한 integrated mechatronics 설계
	저 에너지 손실을 위한 설계
	응용분야의 확대-터보기계, 섬유기계, 에너지 저장 장치, 공작기계 스펀들, 원심분리기, 터보 분자 펌프, 분자빔chopper, 고속 타이어 시험기, 인공위성 자세제어용 모멘텀 휠, 레이트 자이로, 인공위성용 광학장치 지향제어 등
	교육용 프로그램 개발

2.2 해외 연구동향

마그네틱 베어링은 기존의 구름 베어링이나 미끄럼 베어링보다 많은 장점이 있으나 생산비용이 높고 체적이 크므로 고성능화 및 저 에너지 소비를 위해 많은 연구를 수행하고 있다.

2.2.1 고성능화

1) 회전정도 향상 및 진동 억제

마그네틱 베어링의 성능향상을 위해 초정밀 센서의 개발, 센서의 S/N비 향상, 베어링 주위의 電磁적인 잡음 제거, 불균형 응답 및 외란을 제어하기 위한 알고리즘 개발 및 제어 기법에 대한 연구가' 진행되고 있으며

진동억제를 위한 관성 중심 회전에 관한 많은 연구가 진행 중이다. 특히 반도체 산업의 진보에 의해서 디지털 연산속도가 높아짐에 따라 보다 저진동 회전이 가능하고 회전 비동기하의 진동과 주변 구조물의 공진에 의한 진동을 제어하는 기술을 연구 중이다. S2M 사에서는 0.05 μm 의 회전정도를 가진 초정밀 마그네틱 베어링을 개발했다고 보고하고 있다.^(21~26)

2) 부하 용량 및 강성 증대

마그네틱 베어링의 부하용량은 이론적으로 전자석 철심의 포화 자속 밀도에 의해 결정되나, 동적 하중을 베어링이 지지할 경우에는 동적 하중을 포함한 최대 하중에 의한 철심 재료의 포화자속에 의해 결정되므로 부하용량 증대를 위해 자성 재료 개선을 위한 연구가 진행되고 있으며 동적 강성 증대를 위한 광대역 고전류 전력 증폭기 개발 및 특정 주파수의 동적하중에 대해서 선택적으로 강성을 증가시키는 연구, 그리고 회전축의 탄성 변형에 의한 공진 억제 기술과 베어링의 탄성 변형에 의한 변형 모드의 공진현상을 억제하기 위한 기술도 연구되고 있다.^(2,21,27,28)

3) 회전 속도 증대

마그네틱 베어링의 회전속도는 積層 電磁 鋼板의 파괴 강도에 의해 제한되므로 고속 회전시에도 회전자의 자기특성(히스테리시스와 와전류)에 의한 발열 및 에너지 효율의 저하를 무시할 수 있는 고강도 재료 개발이 요망된다. 회전속도가 고속화됨에 따라 2차 이상의 굽힘 모드에서도 운전할 경우가 많으므로 탄성 회전축의 진동 제어를 위한 모델링 및 제어기법 개발, 센서와 액츄에이터의 불일치 문제 해결, 자이로 효과에 대응하는 제어 기법 개발 그리고 광대역 고전류 전력 증폭기 등에 대한 연구가 진행되고 있다.^(24,28~32)

4) 내환경

고온하에서 전자석의 철심 재료는 퀴리 점

온도까지 사용이 가능하지만 현실적으로 권선 재료의 내열성이 고온 사용 한계를 결정하므로 세라믹 피복의 전선 재료 개발 기술 확립을 위한 연구가 진행중이며, 고진공하에서 도선 피복인 고분자 재료의 가스 발생 방지 및 적층 전자 강판의 표면에 기체분자 흡착 방지를 위한 연구가 진행중이다. 현재 극저온 용도로서 4 K에서 운전되는 헬륨 펌프가 시제작되었으며 10^{-11}Torr 의 극진공 터보펌프와 회전체의 온도가 500°C 달하는 X선 관용 마그네틱 베어링이 개발되었다는 보고가 있다.⁽⁸⁾

5) 신뢰성 향상

마그네틱 베어링의 신뢰성을 높이기 위해 여유 전자석 및 제어기를 이용한 안정화 연구가 진행되고 있으며,^(33,34) H_{∞} 제어 및 가변구조 제어 등 강건제어 기법을 마그네틱 베어링의 제어에 적용하는 연구가 진행되고 있다.^(25,31)

2.2.2 소형화

마그네틱 베어링의 크기를 작게 하기 위해 반경 방향 베어링과 축방향 베어링이 일체로 된 원추형 마그네틱 베어링이 개발되었으며,⁽¹⁰⁾ 전동기 권선에 마그네틱 베어링용 권선을 추가하여 브러시가 없는 모터, 동기 모터 혹은 유도 모터 등의 회전자를 대상으로 모터의 기능인 회전 제어와 마그네틱 베어링의 기능인 부상 제어를 동시에 하는 모터와 마그네틱 베어링의 복합형 시스템이 개발되었다.⁽³⁵⁾ 또한 전자 산업의 발달에 의해 초소형 전동기 개발에 응용되는 반도체의 에칭 기법을 응용한 초소형 마그네틱 베어링에 대한 연구가 진행되고 있다.⁽³⁶⁾

2.2.3 생산 및 운용 비용 절감

1) 생산 비용 절감

마그네틱 베어링은 센서, 전력 증폭기, 제

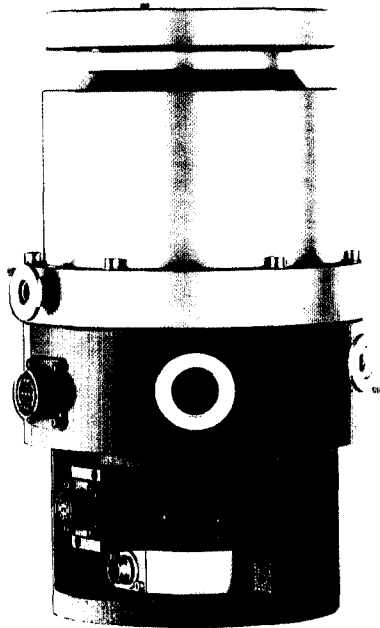


그림 4 S2M사의 TURBOVAC 340M 터보분자 펌프

어기, 회전축 그리고 액츄에이터 등으로 구성되어 일반적으로 기존의 베어링보다 고가이다. 그래서 생산 비용을 절감하기 위해 저가의 센서 및 수동형 베어링 개발, 그리고 변위 센서를 사용하지 않는 마그네틱 베어링을 구현하기 위한 연구가 진행중이다. 변위 센서를 사용하지 않고 마그네틱 베어링을 부상 및 안정화시키기 위해 전자석의 권선에 흐르는 전압과 전류와의 관계로부터 공극 변화의 속도 추정, 전류와 자속의 변화로써 공극의 변화 추정, 마그네틱 베어링이 PWM 방식으로 구동될 때 반송파 성분의 전압과 전류와의 관계로부터 공극의 변화 추정 방법을 이용하거나 관측기에 의해 시스템을 부상 및 안정화시키는 연구가 진행되고 있으나 아직 기존의 능동 마그네틱 베어링에 비해 강건성과 성능이 떨어진다.⁽³⁷⁾ 그리고 수동형 베어링으로서 교류 공진 마그네틱 베어링, 교류 베어링, 그리고 고속 이동 자계에 의한 와전류 발생을 이용하는 베어링 등이 있으나

강성과 부하 용량이 작고 감쇠가 없거나 작으며 혹은 열손실이 크기 때문에 특수한 목적용으로만 연구되고 있다.⁽¹⁾

2) 운용 비용 절감

마그네틱 베어링의 최적 설계 및 전자석의 적절한 극배치에 의한 손실 감소, 고성능 PWM 전력 증폭기 개발 혹은 영구 자석에 의해서 정적하중을 지지하고 능동 제어에 의해서 시스템을 안정화시키는 수동 능동 복합형 마그네틱 베어링 개발에 의한 운용 비용을 절감하는 연구가 진행되고 있다.^(37,38)

2.3 해외 응용 추세

2.3.1 진공장치

1) 터보 분자 펌프

마그네틱 베어링은 윤활유를 사용하지 않으므로 초진공 및 연속 사용이 가능하며 펌프 2대를 동축으로 직렬연결하여 극고진공의 펌프를 제작할 수 있다. 이 펌프는 저진동으로 구동되기 때문에 nano meter에서 angstrom까지의 초고분해능을 가진 전자 현미경(반도체 제조 공정의 회로 패턴 검사에 이용)에 사용되며 연속 운전에 의한 반도체 제작 설비의 생산성 향상, 반도체 제조의 드라이 에칭 프로세스 등에 이용되고 있다. 터보 분자 펌프는 프랑스의 S2M사, 일본의 세이코 精機(株), (株)大阪真空機器製作所, NTN 東洋베어링(株), 光洋精工(株) 등의 회사에서 용도에 따라 1축, 3축, 5축의 베어링이 개발되어 1993년 현재 6000대 이상이 가동되고 있다.^(4,21,39)

2) 의료용 X선관

마그네틱 베어링은 고정자와 회전축 간에 공극이 있기 때문에 금속 캡슐, 전동기 그리고 회전축은 밀봉하여 진공으로 사용하고 고정자는 외부에 배치하여 액체에 의해 냉각시켜 베어링의 수명과 신뢰성을 개선하고 X선의 강도를 높일 수 있다. 윈트젠 촬영과 CT

단층 촬영 스캐너에 이용되고 있다. (4.39)

3) 초고진공내의 반송 장치 및 극좌표 로봇
반도체 공장의 클린 룸에서는 먼지나 소음의 발생이 없고 고초진공이어야 LSI의 집적도가 높아지므로 마그네틱 베어링을 이용한 반송장치의 이용이 증가되고 있다. 부상체의 선단에서 반도체 웨이퍼를 떠올려 이송하는 반송장치와 격벽내에 전자석과 축방향 구동장치가 조합되어 있고 격벽 외측의 부상체가 수평 이동해서 웨이퍼를 반송하는 극좌표 로봇이 있으며 64 MB DRAM 제조용에 사용되고 있다. (4.24)

2.3.2 공작기계용 스피들

마그네틱 베어링을 사용함으로써 고정도, 고속, 저진동 그리고 저발열인 스피들을 구현할 수 있으며 회전 정도의 보정, 비진원 가공 및 비원통 가공 등의 특수 가공이 가능하며 전자석에 흐르는 전류를 모니터하여 절삭 상태 및 공구의 마멸상태를 감시할 수 있다. 주로 내면 연삭기, 밀링 머신 등에 이용되며 S2M사, JMB, NTN 東洋베어링 등에서 제작 판매하고 있다. (4.24,39)

2.3.3 우주 항공 산업용

1) 인공 위성 자세제어용 모멘텀 휠

인공 위성에서는 진공 중에서 무보수 운영을 필요로 하고 전원의 용량이 적으므로 영구자석을 병용한 마그네틱 베어링을 이용하여 소비전력을 극소화한다. 마그네틱 베어링이 최초로 제품화된 분야이며 ESA, NASA, Aerospace사, SEP사 등이 개발하고 있고 최근 일본에서는 H-1 로켓에 탑재했다. (24)

2) 위성 화상 재생 장치

마찰 계수의 변화가 아주 작은 마그네틱 베어링을 사용함으로써 위성 카메라에서 촬영한 선명한 화상을 양호하게 재생할 수 있다. 1974년부터 1988년까지 33대가 SPOT

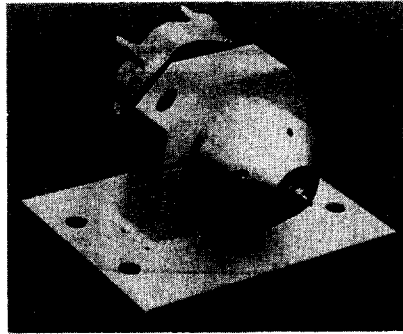


그림 5 S2M사의 고속 연삭용 스피들

위성 시스템용으로 제작되었다. (39)

3) 로켓 엔진 터보 펌프

액체 산소와 액체 질소를 연료로 사용하는 로켓 엔진은 아주 고속으로 운전되므로 마찰, 마멸 그리고 피로파괴의 문제로 기존의 베어링을 대신해 마그네틱 베어링을 사용한다. (40)

4) 위성 안테나의 방향 제어 시스템

위성과 지상 관측소는 아주 먼 거리에 위치하므로 아주 작은 오차도 심각한 문제를 유발하므로 정확한 지향제어가 요구된다. 이러한 경우 마찰이 없는 마그네틱 베어링 부상장치를 구동함으로써 안테나와 위성을 정확하게 정렬시킬 수 있다. (41)

2.3.4 기타 산업에의 응용

1) 전기 자동차 플라이 휠

환경 오염 문제로 전기 자동차에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으나 축전지의 낮은 비에너지와 긴 충전 시간이 문제되고 있다. 마그네틱 베어링을 이용한 비 에너지가 높은 고속 플라이 휠을 사용함으로써 축전지 사용량을 줄이고 자동차의 중량을 줄여 에너지를 절약하는 연구가 진행되고 있다. (42)

있어서 고려되지 않은 고차 모드에 의한 불안정 방지를 위해 이방법을 적용하고 있다.

2) 원심 압축기

천연가스 송유관은 윤회에 의한 스케일링

문제와 운전중 고장의 대부분이 윤활 계통이므로 마그네틱 베어링을 사용함으로써 윤활이 필요없으며 유지 보수 비용을 줄이고 시스템 공간을 40% 정도로 줄일 수 있을 뿐만 아니라 에너지 손실도 1/6 이하로 줄일 수 있다는 보고가 있다. 또한 운전중 모니터에 의해 밀봉 상태 감시 및 원격지에서 유지 보수가 가능하다.^(24,39)

3) 극 저온 압축기

극 저온하에서는 회전축의 길이가 축소될 뿐만 아니라 특수한 비대칭 구조를 가진 회전자가 변형이 크기 때문에 불균형 상태에서 고속 회전하기 위해서 마그네틱 베어링의 자동 밸런싱에 의해 관성 주축 주위로 회전한다.⁽⁴⁵⁾

4) 기타

터보 Expander, 뉴트론 초과, 스테링 냉동기, 터빈 발전기, 댐퍼, 정밀 위치 결정 기구, 내마모성, 내구성 및 저진동이 요구되는 기계요소 등에 사용되고 있다.^(24,39)

3. 마그네틱 베어링의 제어 방법

마그네틱 베어링의 제어에 있어서 고속 생산장치의 출현으로 종래의 단일 입출력 아날로그 제어에서 다입출력 및 디지털제어에 의한 시스템 안정화, 높은 회전 정도 및 신뢰성 재고를 위해 많은 제어 방법이 연구되고 있다.

3.1 PD 및 PID 제어

회전축의 변위와 속도를 궤환 제어하는 PD제어와 정상상태의 오차를 보상하기 위해 변위의 적분항을 추가한 PID제어는 간단하고 저렴하기 때문에 가장 널리 이용되는 방법이며 자이로 효과 및 수직 수평의 연성을 무시할 수 있는 경우에는 각각의 자유도에 대해 독립적인 아날로그 제어 혹은 디지털 제어를 쉽게 구현할 수 있다. 그러나 회전축

의 중심 이동, 관성량 변화 등 제어대상의 변화에 대응하지 못하며 자이로 효과가 큰 경우는 시스템이 불안정하게 된다. 마그네틱 베어링은 자이로 효과에 의해 세차운동과 장동운동이 발생하는데 자이로 효과가 커지면 세차운동이 불안정화되므로 각변위를 교차제어(cross feedback)함으로써 세차운동에 복원 모멘트를 주거나 각속도를 교차제어 함으로써 자이로 작용을 억제한다.⁽³⁵⁾ 그리고 노치필터(notch filter)를 이용하여 자동 균형잡기(automatic balancing)를 함으로써 불균형력을 제어할 수 있다.⁽²⁶⁾

3.2 최적제어

회전축의 변위와 속도를 상태변수로 하는 LQ제어와 변위의 적분항, 변위 그리고 속도를 추가한 적분형 LQ제어 및 불균형력을 하나의 상태변수로 취급하여 불균형력을 제어하는 LQ제어 등이 이용되고 있다. 안정한 제어 이득을 Riccati 방정식으로부터 쉽게 얻을 수 있고 우수한 저감특성을 가지므로 많이 이용되고 있으나 제어대상의 변화에 대응하지 못하고 최적인 제어이득을 구하기 위해서는 많은 경험이 필요하다.

3.3 H_{∞} 제어

시스템의 불확정성과 변동을 주파수 영역에서 취급하는 강건한 제어기로서, 주어진 전달함수의 크기를 궤환에 의해 가능한 작게 하는 제어이다. 강건 안정화와 외란 억제 제어를 할 수 있으며 구현 방법에는 전달함수를 기본으로 한 해법과 상태방정식을 기본으로 한 해법이 있다. 마그네틱 베어링에서는 회전축의 관성량 변화 등과 같은 시스템의 불확정성에 의한 불안정 방지 및 탄성 회전축을 가진 마그네틱 베어링의 제어기 설계에 있어서 고려되지 않은 고차모드에 의한 불안정 방지를 위해 이 방법을 적용하고 있다.⁽³¹⁾

최근에는 H_∞ 제어방법을 발전시킨 μ -synthesis도 이용되고 있다.⁽⁴³⁾

3.4 가변구조 제어(VSSC : Sliding Mode Control)

희망하는 특성을 얻기 위해 제어구조를 불연속적으로 변환하여 상태공간내에 설정한 초평면상에 상태변수를 구속함으로써 sliding mode를 실현한다. Sliding mode에서는 매개변수의 변동, 비선형성 그리고 외란 등에 대해서 둔감한 강건한 시스템을 실현할 수 있다. 최근 전력용 소자의 발달과 고속 DSP의 출현으로 sliding mode의 고속 스위칭이 가능하여 전동기, 로봇 팔 등에 이용이 증가하고 있으며 선형계, 비선형계, 시변계에 응용이 가능하다. 회전축의 관성량 변동 혹은 탄성회전축에서 고려하지 않은 고차모드에 의한 불안정 방지 및 외란 제어에 이용되며 VSS 관측기를 가진 sliding mode 제어도 연구되고 있다.^(28,44) Sliding mode 제어는 성능에 비하여 설계가 쉬울 뿐만 아니라 磁力的 비선형성과 PWM 전력 증폭기 사용의 증가에 따라 마그네틱 베어링 제어기에 적용하기 위한 많은 연구가 진행되고 있다.

3.5 외란 억제를 위한 제어

시스템의 안정화는 최적제어나 극배치법에 의한 케환제어에 의하여 달성하되, 불균형력이 있는 외란을 상태변수로 가정하여 확대상태 방정식을 도입하고 외란을 관측기에 의해 추정된 후 그것을 feedforward 제어에 의해 소거한다. 제어 입력은 외란을 제어하기 위한 feedforward 입력과 시스템 안정화를 위한 케환 입력으로 구성된다.⁽⁴⁵⁾

3.6 기타 제어 방법

용도에 따라 자속 및 전류 케환제어, 위상

보상제어, 뉴로 퍼지 제어, 적응제어, 학습 제어, SPOC-D(structure predefined optimal control for discrete system) 등 여러 종류의 제어 방법이 있다.

4. 복소영역에서의 접근 : 등방 최적제어⁽¹¹⁾

복소영역에서 회전체-베어링 계의 동적 해석은 회전체의 물리적 특성을 정확하게 이해할 수 있으며 등방시스템 방정식의 차수를 반으로 줄일 수 있기 때문에 아주 유용하게 이용되고 있다. 그림 6은 4축 강체 회전체 마그네틱 베어링 시스템을 나타낸 것으로 운동방정식을 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$M\ddot{q} + C\dot{q} + K_q q = K_i i \quad (1)$$

여기서, M , C , K_q , K_i 는 질량, 자이로 효과, 위치 및 전류 감성을 나타내는 4×4 행렬이고 q 와 i 는 변위와 전류를 나타내는 벡터이다. 이 시스템은 4개의 독립적인 PD 제어기에 의해 전류를 제어함으로써 안정화시킬 수 있으며 이것은 일반적으로 이방성을 가진 4축 마그네틱 베어링이 되고 복소 영역에서 운동 방정식을 표현하면 식 (2)와 같이 등방성을 나타내는 항과 이방성을 나타내는 항으로 쉽게 구분할 수 있다.

$$M_c \ddot{p} + C_c \dot{p} + K_c p + C_d \dot{p} + K_d p = g \quad (2)$$

여기서, $p = y + jz$, $g = f_y + jf_z$ 이고 2×2 복소행렬 M_c , C_c , K_c 는 마그네틱 베어링의 등방

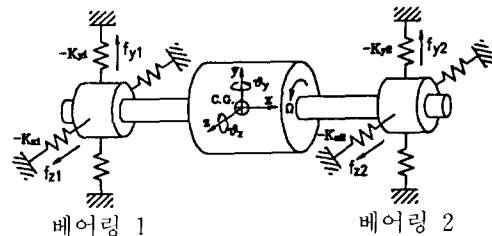


그림 6 강체 회전체 4축 능동형 마그네틱 베어링의 모형화

성을 나타내며, 2×2 복소행렬 C_d, K_d 는 마그네틱 베어링의 이방성을 나타낸다. 복소영역에서, 마그네틱 베어링 시스템의 등방 최적제어는 두 단계로 구성되는데 먼저 마그네틱 베어링이 가진 이방성을 제거하여 등방성만 가지게 한 후 최적제어에 의해 등방 마그네틱 베어링을 제어한다. 즉 식 (2)에서 복소 제어력 g 를 식 (3)과 같이 이방성 제어를 위한 입력과 등방 시스템 제어를 위한 입력으로 나누어 표현할 수 있다. 즉

$$g = g_c + g_d \quad (3)$$

여기서, 식 (4)가 되도록 제어한다면 식 (1)은 로 되어 등방 마그네틱 베어링이 되며 축약된 식 (5)를 이용하면 복소 상태공간에서 최적제어기를 용이하게 설계할 수 있다.

$$G_d = C_d \dot{p} + K_d \bar{p} \quad (4)$$

$$M_c \ddot{p} + C_c \dot{p} + K_c p = g_c \quad (5)$$

일반적인 최적제어와 달리 등방 최적제어에서는 제어된 시스템이 항상 등방성을 유지하며, 복소영역에서 취급하므로 시스템 방정식의 차수가 반으로 줄며 시스템 특성을 이해하기 쉽다.

일반적인 마그네틱 베어링 시스템에서 질량의 불균형에 의해 발생하는 회전축의 불균형 응답의 경우 보통 최대 불균형 응답과 최대 제어입력이 관심의 대상이 된다. 기존의 최적제어에서 불균형 응답은 전방향 선회운동과 후방향 선회운동을 가지므로 선회운동이 타원형으로 되나 등방 최적제어에서는 후방향 선회운동은 없고 전방향 선회운동만 있으므로 선회운동이 진원으로 된다.

그림 7은 등방 최적제어와 기존의 최적제어에 의한 불균형 응답과 제어입력을 나타낸 것으로 제어입력은 같게 유지하면서도 등방 최적제어에 의한 원 선회운동의 직경이 기존의 최적제어에 의한 타원 선회운동의 장축보다 작게 됨을 볼 수 있다. 등방 최적제어에서는 후방 선회운동을 후방 제어력의 위상 혹은 크기를 변화시켜 제어할 수 있는데, 제

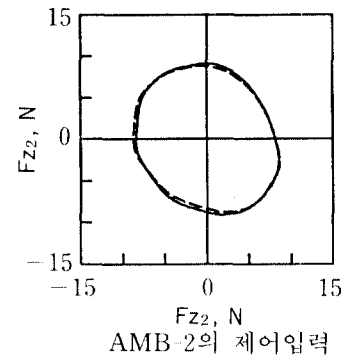
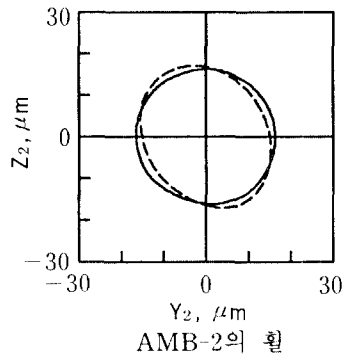


그림 7 등방 최적제어와 최적제어에 의한 불균형 응답과 제어입력

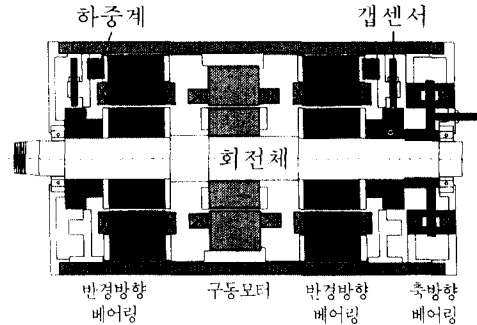


그림 8 하중계를 내장한 지능형 고속 스피들

어력의 크기를 변화시키지 않고 위상만 변화시키면 최대 제어 입력은 영향을 받지 않으면서도 불균형에 대한 최대 선회반경을 효율적으로 줄일 수 있다.

5. 지능형 마그네틱 베어링

능동형 마그네틱 베어링은 능률과 고정도

를 동시에 추구할 수 있으며 자신이 센서와 액츄에이터로서의 기능을 가지고 있으므로 사용자가 상황에 대응하여 시스템을 수정할 수 있고 시스템으로부터의 정보를 이용하여 상황 감시 및 진단을 할 수 있는 지능형 마그네틱 베어링으로 이용될 수 있다.^(5,39) 표 3은 지능형 능동 마그네틱 베어링의 개발 및 연구 추이를 나타내고 있다.

5.1 상황감시 및 진단 기능

마그네틱 베어링의 회전축 변위와 전자석에 흐르는 전류 혹은 전자석에 작용하는 축하중을 측정하여 실시간 자기진단 및 매개변수 규명을 할 수 있으며 동작기계 스피너들의 응용시에는 절삭 상황을 실시간 감시함으로써 과대한 절삭력에 의한 공구의 마멸·손상 및 제품의 불량을 방지하고 또한 공구 마멸 정도를 판단하여 적기에 공구를 교환함으로써 가공형상 오차와 가공면 손상이 일어나는 것을 방지할 수 있다.

5.2 상황 적응 기능

지능형 마그네틱 베어링은 回轉 翼의 파손과 같은 갑작스런 외란이 작용할 때 외란을 감지하여 디지털 제어기에 의해서 제어할 수 있을 뿐만 아니라 상황에 대응하여 베어링의 감쇠 계수 혹은 강성을 변화시켜 시스템의 특성을 변화시킬 수 있다. 그리고 전자석에 흐르는 전류나 전자석에 작용하는 축하중과 같은 여분의 정보를 이용하여 시스템의 신뢰성을 향상시킬 수 있으며, 또한 여분의 전자석 혹은 제어기를 배치하여 시스템의 신뢰성을 향상시킬 수도 있다. 지능형 마그네틱 베어링을 이용한 산업용 로봇에 의한 제품의 조립시에 마그네틱 베어링 자체의 변위센서에 의해 조립할 부품의 현위치를 파악하고 전자석에 흐르는 전류나 전자석에 작용하는 축하중을 측정하여 접촉하중을 추정함으로써

보다 정확하고 신속하게 제품을 조립할 수 있는 지능형 산업용 로봇을 구현할 수 있으며,⁽⁴⁶⁾ 지능형 마그네틱 베어링을 이용한 동작기계에서는 회전축의 위치를 제어함으로써 원형의 가공뿐만 아니라 타원형 및 곡면 가공, 공구의 마멸을 보상하여 절삭할 수 있는 지능형 밀링 머신이나 연삭기를 구현할 수 있다. 그림 8은 압전형 하중계를 내장한 마그네틱 베어링을 이용한 동작기계의 스피너들로 회전축의 변위, 전자석에 흐르는 전류 및 전자석에 작용하는 축하중을 측정함으로써 시스템의 매개변수 규명, 자기진단 및 신뢰성을 향상시킬 수 있게 개발한 지능형 고속 스피너들이다.⁽¹²⁾

6. 맺음말

이 글에서는 마그네틱 베어링의 일반적인 특성, 국내외의 연구동향 및 응용추세, 능동형 마그네틱 베어링의 각종 제어 방법에 대하여 기술하였다. 특히 능동형 마그네틱 베어링은 부하능력이 크고 신뢰도가 높을 뿐만 아니라 상황감시 및 진단 기능과 상황 적응 기능을 갖는 지능형 마그네틱 베어링으로도 이용될 수 있기 때문에 응용 분야가 확대되고 있고 일부 제품은 이미 실용화되었다. 앞으로 마그네틱 베어링의 고성능화, 소형화, 생산 및 운용 비용 절감을 위한 연구와 특정한 분야에의 응용을 위한 연구가 국내외에서 활발히 진행될 것으로 예상된다.

참고문헌

- (1) Bleuler, H., 1992, "A Survey of Magnetic Levitation and Magnetic Bearing Types," *JSME International J., Series III*, Vol. 35, No. 3, pp. 335~342.
- (2) Habermann, H. and Liard, G., 1980, "An Activemagnetic Bearing System," *Tribology international*, April, pp. 85~89.

- (3) 김철순, 하영호, 이종원, 1990, “능동자기 베어링시스템의 설계,” 한국소음진동공학회 추계학술대회논문집, 서울.
- (4) 大田眞土, 1993, “能動形磁氣軸受とその應用,” 機械の研究, 第45卷 第2號, pp. 280~285.
- (5) Schweitzer, G., 1990, “Magnetic Bearings-Applications, Concepts and Theory,” *JSME International J., Series III*, Vol. 33, No. 1, pp. 13~18.
- (6) 김승중, 김철순, 이종원, 1991, “능동자기 베어링지진 정밀회전축계 해석,” 소음진동공학회 추계학술대회논문집, 서울, pp. 133~137.
- (7) 한동철, 1990, “마그네틱 베어링의 소개,” 대한기계학회지, 제30권 제5호, pp. 454~459.
- (8) 박신현, 1983, “자석베어링의 실험적 연구,” 한국과학기술원 기계공학과 석사학위논문.
- (9) Lee, C. W. and Kim, J. S., 1992, “Modal Testing and Suboptimal Vibration Control of Flexible Rotor Bearing System by Using a Magnetic Bearing,” *Trans. of ASME, J. of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol. 114, pp. 244~252.
- (10) 정호섭, 김철순, 이종원, 1993, “원추형 능동자기 베어링계의 모형화 및 제어,” 대한기계학회 논문집, pp. 3073~3081.
- (11) Kim, C. S. and Lee, C. W., 1994, “Isotropic Optimal Control of Active Magnetic Bearing System,” *Proc. of The Fourth Symposium on Magnetic Bearings*, Zurich, pp. 35~40.
- (12) Lee, C. W., Ha, Y. H. and Kim, C. S., 1994, “Identification of Active Magnetic Bearing System by Using Force Measurement,” *Proc. of The Fourth Symposium on Magnetic Bearings*, Zurich pp. 305~310.
- (13) 권계시, 정호섭, 이종원, 1994, “전류 신호를 이용한 전자기 베어링계의 제어, 대한기계학회 춘계학술대회 논문집, 대전, pp. 655~658.
- (14) Han, D. C., Jang, I. B. and Jung, S. C., 1993, “A Study of the PID Controlled Magnetic Bearing of a Rotor System,” *Proc. of Asia-Pacific Vibration Conference '94*, Kitakyushu, November, pp. 1020~1025.
- (15) 경진호, 김종선, 이해, 1991, “PID 제어를 이용한 능동형 자기베어링의 설계 및 실험적 동특성 연구,” 한국소음진동공학회 춘계학술대회논문집, 대전, pp. 83~39.
- (16) Kim, J. S., Kyung, J. H. and Lee, H., 1993, “Fuzzy Expert PID Control of Magnetic Bearing System,” *Proc. of Asia-Pacific Vibration Conference '94*, Kitakyushu, November, pp. 462~467.
- (17) 박철우, 김중배, 이상조, 박영필, 1991, “자기베어링의 설계와 실험적 동특성,” 대한기계학회 추계학술대회 논문집, 서울, pp. 400~403.
- (18) 손태규, 유원희, 박영필, 1992, “전자기력을 이용한 능동제진,” 한국정밀공학회 추계학술대회 초록집, 서울, pp. 179~183.
- (19) 이호진 외 5인, 1991, “준용융법으로 제조된 고온 초전도체를 이용한 베어링 및 축회전 구동장치, The 15th Workshop on High Temperature Superconductivity, 대전, pp. 216~220.
- (20) 박영진, 정성중, 김종선, 1992, “능동자기 베어링 시스템에서 PD와 PID 제어기의 특성 비교,” 92년도 추계학술대회초록집, 한국정밀공학회, 서울, pp. 134~138.
- (21) 大田眞土, 1991, “磁氣軸受の高性能化とその應用,” 精密工學會誌, 第57卷 第4號, pp. 549~598.
- (22) Eisenhaure, D. B., et al., 1990, “Extreme Precision Magnetic Bearings

- for Linear and Rotary Applications," *Proc. of The Second International Symposium on Magnetic Bearings*, Tokyo, Japan, pp. 243~250.
- (23) Higuchi, T., Mizuro, T. and Tsukamoto, M., 1990, "Digital Control System for Magnetic Bearing System with Automatic Balancing," *Proc. of The Second International Symposium on Magnetic Bearings*, Tokyo, Japan, pp. 27~32.
- (24) 松村文夫, 1987, "磁氣軸受の現状と應用," *機械の研究*, 第39卷 第1號, pp. 31~36.
- (25) Misovec, K. M., Flynn, F., Johnson, B. G. and Hedrik, J. K., 1990, "Sliding Mode Control of Magnetic Suspensions for Precision Pointing and Tracking Applications," *Active Noise & Vibration Control*, NCA-vol-8, ASME's 1990 Winter Annual Meeting, pp. 75~80.
- (26) Johnson, B. G., Hockney, R. C. and Misovec, K. M., 1988, "Active Synchronous Response Control of Rigid-Body Rotors," *Proc. of the Institution of Mechanical Engineers*, International Conference Vibrations in Rotating Machinery, 13~15 September, 1988, Edinburgh, C290/88, pp. 33~39.
- (27) Borostein, K. R., 1991, "Dynamic Load Capabilities of Active Electromagnetic Bearings," *Trans. of the ASME, J. of Tribology*, Vol. 113, pp. 589~603.
- (28) Bardas, T., Harris, T., Oleksuk, C., Eisenburt, G. and Geerligs, J., "Problems, Solutions and Applications in the Development of a Wide Band Power Amplifier for Magnetic Bearings," *Proc. of The Second International Symposium on Magnetic Bearings*, Tokyo, Japan, pp. 219~227.
- (29) Salm, J. R., 1988, "Active Electromagnetic Suspension of an Elastic Rotor: Modeling, Control, and Experimental Results," *Trans. of ASME, J. of Vibration Acoustics*, Stress and Reliability in Design, Vol. 110, pp. 493~500.
- (30) Okuda, Y., Nagai, B. and Shimane, T., 1992, "Cross-Feedback Stabilization of the Digitally Controlled Magnetic Bearing," *Trans. of ASME, J. of Vibration and Acoustics*, Vol. 114, pp. 54~59.
- (31) 崔衛民, 野波 健藏, 1992, "彈性ロ-タ. 磁氣 軸受系の H_{∞} 制御," *日本機械學會 論文集(C 篇)*, 第58卷 第553號, pp. 2650~2656.
- (32) Rawal, D., Keesee, J. and Gordon, R., 1991, "The Effect of Sensor Location on The Forced Response Characteristics of Rotors with Active Magnetic Bearings," *ASME DE-Vol. 35, Rotating Machinery and Vehicle Dynamics*, pp. 209~217.
- (33) Lyons, J. P., Preston, M. A., Gurumoorthy, R. and Szczesny, P. M., 1994, "Design and Control of a Fault-Tolerant Active Magnetic Bearing System for Aircraft Engines," *Proc. of The Fourth International Symposium on Magnetic Bearings*, Zurich, pp. 449~454.
- (34) Williams, R. D., Wayner, P. M., Ebert, J. A. and Fedigan, S. J., 1994, "Reliable, High-Speed Digital Control for Magnetic Bearings," *Proc. of The Fourth International Symposium on Magnetic Bearings*, Zurich, pp. 1~6.
- (35) Chiba, A., Rahman, M. A. and Fukao, T., 1991, "Radial Force in Bearingless Reluctance Motor," *IEEE Trans. on Magnetics*, Vol. 27, No. 2, pp. 786~790.
- (36) Bleuler, H., et al., 1994, "Micromachined Active Magnetic Bearings," *Proc. of The Fourth International Symposium*

- on *Magnetic Bearings*, Zurich, pp. 349~352.
- (37) 栗田裕, 1992, “電磁石による變位ヒンサレス制御(電流と磁速のフィードバックによる振動制御),” *日本機械學會論文集(C編)*, 第58卷 第556號, pp. 353~356.
- (38) Sortore, C. K., Allaire, P. E., Maslen, E. H., Humphris, E. H. and Studer, P. A., 1990, “Permanent Magnet Biased Magnetic Bearings-Design, Construction and Testing,” *Proc. of The Second International Symposium on Magnetic Bearings*, Tokyo, Japan, pp. 175~182.
- (39) 磯具登, 1993, “磁氣軸受の工業への應用,” *機械の研究*, 第45卷 第3號, pp. 356~362.
- (40) 金光陽佚, 1991, “磁氣軸受の現状と課題,” *機械の研究*, 第43卷 第6號, pp. 657~662.
- (41) Higuchi, T., Takahashi, H., Takahara, K. and Shingu, S., 1990, “Development of Magnetically-Suspended Tetrahedron-Shaped Antenna Pointing System,” *Proc. of The Second International Symposium on Magnetic Bearings*, Tokyo, Japan, pp. 9~14.
- (42) Ashley, S., 1993, “Flywheel Put a New Spin on Electric Vehicles,” *Mechanical Engineering*, October, pp. 44~51.
- (43) Nonami, K. and Ito, T., 1994, “ μ Synthesis of Flexible Rotor Magnetic Bearing Systems,” *Proc. of The Fourth International Symposium on Magnetic Bearings*, Zurich, pp. 73~78.
- (44) 野波健藏, 川宏奇, 1994, “ロハ”スト最小次元 VSS オフ“サ”-ハ”を適用した弾性ロータ磁氣軸受系のスライディング”モト制御,” *日本機械學會論文集(C篇)*, 第60卷 第571號, pp. 897~905.
- (45) 川眞田智, 野波健藏, 1990, “弾性ロータのフイートフオワ-ト形不釣合い力相殺制御,” *日本機械學會論文集(C編)*, 第56卷 第528號, pp. 2056~2064.
- (46) Tsuda, M., Higuchi, T. and Fujiwara, S., 1989, “Automated Precision Assembly Using Magnetically Supported Intelligent Hand,” *Robotics Research-1989, The Winter Annual Meeting of ASME*, California, December, DSC-Vol. 14, pp. 195~201. 