

# 마그네틱 베어링의 소개

한 동 철

서울대학교 기계설계학과 교수



● 1943년생  
● 윤활공학 및 요소설계에 관심을 가지고 있다.

## 1. 머리말

마그네틱 베어링은 주로 경하중을 받는 인공 위성에 응용하기 위하여 개발되었으나 현재에 와서는 산업계에 적용되고 있다.

안정된 마그네틱 서스펜션이라는 것은 자연 상태에서 저절로 생기는 것이 아니다. 백오십 여년전에 이미 포텐셜 이론에서 Ernsshaw 정리는 “磁氣변화의 고정배열은 정상적으로 안정일 수 없다”라고 서술된다. 그러나 마그네틱 서스펜션 시스템에 자장변화를 가져옴으로서 물체들이 가까워지고 또는 멀어지는 운동을 방지할 수 있다. 따라서 안정적인 작동을 위하여는 일차원, 이차원 또는 삼차원의 능동제어가 필요하다고 말할 수 있다.

지난 세월동안 영구자석을 완전히 안정된 서스펜션시스템에 적용하는데 대한 특허가 많이 있었으나 작동되는 것은 별로 없다. 그러나 영구자석을 이용하여 지지하려는 대상물의 대부분의 무게를 상쇄시킨 발명들은 많이 있다.

마그네틱 베어링 및 서스펜션의 개발에 관련하여 개척자적인 노력을 기울인 사람은 1940년, 1950년대에 미국 버지니아 대학의 Jesse Beams 를 들 수 있다. 그는 한 평면에 관한 문제를 취급하였고 주로 중력을 이겨 내는데에 응용하였으며 그가 세운 1초당 5백만 회전수 및 10°g 의 원심력 발생은 아직까지 세계기록으로 남아 있다. 그는 계속 버지니아 대학에서 연구하였

으나 30년전에는 고전류를 스위치하는 반도체가 없었으므로 실험실 수준의 일이 되어버리고 중단되었다.

1960년대 Cambion 회사는 최초의 버지니아 대학에서의 회전기계 서스펜션에 관한 연구결과를 발전시키기 시작하여 1980년경까지 성공적으로 이끌어 왔다. 일본과 유럽, 특히 프랑스에서는 1960년대 말경 마그네틱 베어링에 관한 연구를 시작하였다. 대부분의 연구자들은 영구자석이 부분적으로 사용되거나 레이디얼 또는 스리스트중 한방향을 도달아 지지하는 수동형 마그네틱 베어링을 개발하려고 하였다. 문헌조사에 의하면 프랑스회사, Societe de Mechanique Magnetique(S2M)가 능동형 마그네틱 개발에 박차를 가하였다. 1980년에 기술된 바에 의하면 “유럽은 능동형 마그네틱 베어링의 기술에 있어서 미국회사보다 5년 앞서 있다.”

상업적으로 마그네틱 베어링을 제조하는 회사는 두개가 있었는데 하나는 Cambion으로 소형 회전체(예 : 201b, 12000rpm)를 위해 수동형 마그네틱 베어링을 개발하였으나 1980년에 문을 닫았고 프랑스의 S2M은 능동형 마그네틱 베어링 제조회사로서 현재도 활발히 사업을 전개하여 미국에 합자회사 MBI, 일본에 합자회사 JMB를 만들어ACTIDYNE이라는 등록상표의 베어링을 판매하고 있다. 그들의 카탈로그에 따르면 베어링의 회전속도는 0~800,000rpm, 로터직경 14~1,250mm, 허

용하중 0.03kgf~5,000kgf, 주위온도 -253℃ ~ +450℃, 환경조건은 진공, 질소, 헬륨, 탄화수소, 수증기, 액화수소, 액화산소등이며 소형 터보 분자펌프, 고속스핀들, 모터, 터보기계등에 적용되고 있다.

## 2. 마그네틱 베어링의 형식

마그네틱 베어링에는 끌어당기는 형식과 밀어내는 형식의 두가지 작동형식이 있는데 그 특성은 다음과 같다.

- (1) 끌어당기는 작동형식(attractive mode)
  - (가) 회전체가 위로부터 지지되어야 하므로 기계 프레임이 전체 수직하중을 받고 있다.
  - (나) 이 형태는 틈새가 좁아질수록 당기는 힘이 강하여지므로 원래 불안정하다.
  - (다) 자력누설로 인한 손실이 밀어내는 형태에 비해서 작다.
  - (라) 지지 강성을 밀어내는 형식에 비해 크게 할 수 있다.
  - (마) 부하용량을 밀어내는 형에 비해 크게 할 수 있다.
- (2) 밀어내는 작동형식(repulsive mode)
  - (가) 회전체가 밑의 기계대로부터 지지되므로 프레임이 강하게 설계될 필요가 없다.

(나) 이 형태는 틈새가 좁아질수록 밀어내는 힘이 강하여 원래 안정하다.

(다) 고유의 댐핑이 거의 없다.

(라) 저 및 중 하중의 지지 경우에 끌어당기는 형태에 비해 적은 동력이 소요된다.

또한 마그네틱 베어링 제어형식에는 능동형 마그네틱 베어링과 수동형 마그네틱 베어링이 있는데 그 동작 원리와 특성은 다음과 같다.

### (3) 능동형 마그네틱베어링(active magnetic bearing)

능동형 마그네틱 베어링은 그림 1에서 볼 수 있듯이 자성철로된 회전체가 네개의 마주보게 배치되어 있는 전자석에 둘러싸여 있어서 전자석에서 발생하는 자장속에 떠있게 되어 구름 베어링에서와 같은 금속간의 접촉이 이루어지지 않는다. 하나의 전자석에 흐르는 전류는 한 개의 파워앰프로 제어되므로 하나의 회전체를 반경방향과 축방향으로 지지해 주려면 10개의 독립된 전자석 및 앰프가 필요하다(두개의 반경방향 베어링이 네개씩, 그리고 한개의 축방향 베어링이 두개).

회전체의 반경방향으로의 위치는 4개의 비접촉 변위센서에 의해 제어되는데, 회전체가 평형점인 중심에서 어느 한쪽으로 옮겨가려 하면 회전체가 제자리로 돌아가도록 각각의 앰프로 전류가 제어된다. 제어회로에서 이득(gain)을 바꿔줌으로써 강성을 조절할 수 있으며 위상각

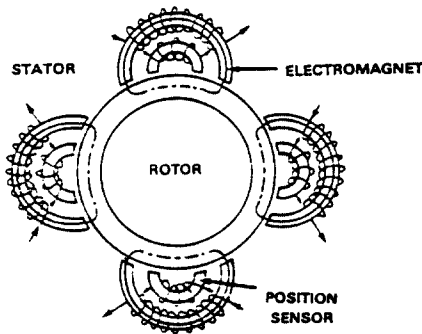


그림 1 베어링 작동 원리

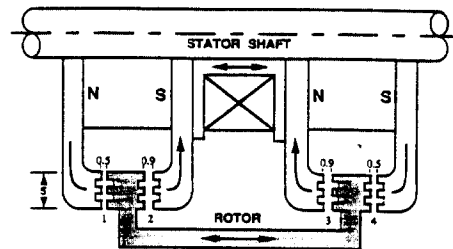


그림 2 수동형 마그네틱 베어링

을 바꿔줌으로써 댐핑값도 조절할 수 있다.

(4) 수동형 마그네틱 베어링 (passive magnetic bearings)

수동형 마그네틱 베어링은 사마리움-코발트계의 재료로 된 영구자석을 마그네틱 서스펜션계의 어느 곳엔가 사용한다. 대부분의 부하용량이 영구자석의 자장으로 인하여 생기므로 능동형 마그네틱 베어링에 비해 효율적이다. 수동형 마그네틱 베어링은 원래 두방향으로 고유의 안정성을 갖고 있으므로 한 방향으로만 제어해 주면 된다.

그 예가 그림 2에 나타나 있는바 치형상의 상대면을 형성하여 주변 磁氣 구배가 높아져 위치제어를 더 정밀하게 할 수 있다. 강성은 조절될 수 없다.

3. 능동형 마그네틱 베어링의 형상

(1) 반경방향 베어링 (radial bearing)

회전자는 자철박판을 축에 억지끼워 맞춤으로 적층되어 있는 형상으로 그림 3에서 보는 바와 같이 전자적인 고정자를 축에 넣고 밖에서 둘러싼 상태로 또는 외부에 설치된 고정자의 내부에 들어가 있는 상태고정자와 접촉없이 평형점을 중심으로 회전할 수 있다. 회전자중심의 위치는 피이드 백 회로로 연결되는 센서에 의해 제어된다. 박판의 두께는 0.05mm에서 0.35mm까지의 치수가 사용되며 재질은 주로 3%의 Fe-Si이다.

(2) 축방향 베어링 (axial bearing)

작동원리는 반경방향 베어링과 동일하나 그림 4에서 보는 바와 같이 원판형의 아마츄어가 축에 수직되게 설치되어 있고, 그 양쪽에 원판형의 전자석이 있게 된다. 센서는 축의 끝에 설치될 수 있다. 회전자는 박판을 적층하여 제작할 필요가 없으며 일반적으로 한 덩어리의 자성철을 가공한 것이다.

(3) 원추형 베어링 (conical bearing)

설치 공간을 줄이는등 특수 목적에 의해 15° 정도 경사진 원추형의 베어링이 사용되는데 반

경방향과 축방향의 하중을 동시에 받을 수 있다. 그림 5에는 원추형 베어링을 사용한 전동기의 단면도가 그려져 있다. 축방향 베어링 및 센서가 따로 분리되어있지 않으므로 제어가 복잡하고 비용이 더 들게 된다.

(4) 보조베어링 (auxiliary bearing)

보조베어링은 기계가 작동을 중지했을 때 자철회전체를 보호하기 위하여 마그네틱베어링과는 별도로 설치되어 있으며 건윤활의 구름베어링 또는 카본링을 보조베어링으로 사용하는데 틈새는 마그네틱베어링의 틈새의 반정도가 된다. 그림 5의 전동기의 양단에 설치된 것이 보조베어링이다.

(5) 제어시스템 (control system)

마그네틱 베어링에 지지된 회전체계의 해석 모델이 그림 6에 나타나 있고 피이드 백제어의 단순화된 블록선도가 그림 7에 그려져 있다. 이 시스템은 고주파 위치 센서에 감지된 변위 신호에 따라 전자석의 전류를 제어함으로써 회

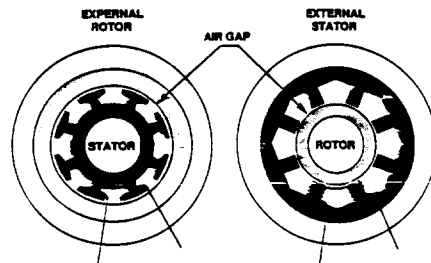


그림 3 레이디얼 베어링 형상

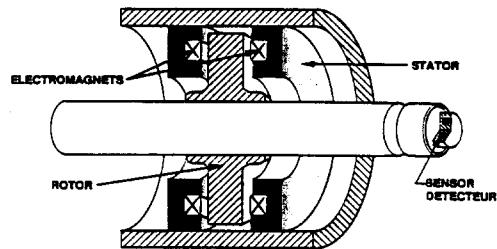


그림 4 스러스트 베어링 형상

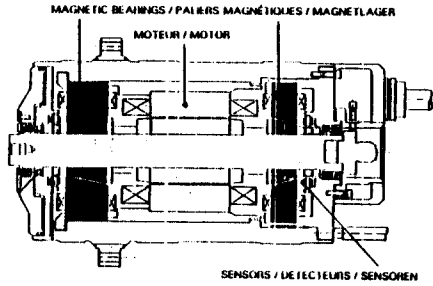


그림 5 마그네틱 베어링에 지지된 모터

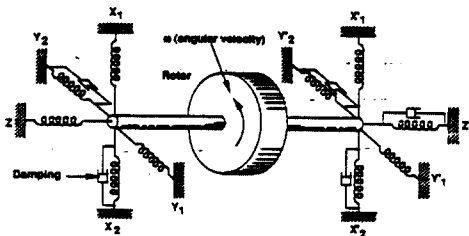


그림 6 마그네틱 베어링 모델

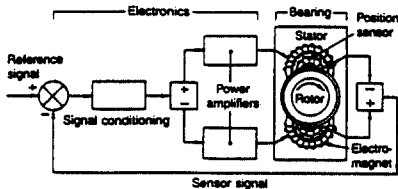


그림 7 능동형 마그네틱 베어링 제어(S2M)

전자의 중심위치를 제어한다. 표준형의 서보 제어기구는 출력을 입력으로 나눈것과 같은 전달함수를 갖게 되는데 이 전달함수가 바로 능동형 마그네틱 베어링이 성공적으로 작동할 수 있는냐의 관건이 된다. 전달함수에 의해 요구되는 신호조정이 마그네틱 서스펜션 시스템의 강성 및 댐핑 특성, 나아가서는 안정성과 운전 특성을 결정하는 것이다. 제어기구는 주로 PID제어기구가 많이 쓰인다.

(6) 파워앰프(power amplifier)

파워앰프의 필요 용량은 전자석의 최대 자력, 틱새, 서보시스템의 응답시간에 의해 좌우

된다. 파워앰프의 크기는 회전체의 무게에 직접적인 관련이 있는 것이 아니고 회전체의 무게에 대한 교란되는 힘의 비에 관계된다.

(7) 틱새(air gap)

회전자의 직경이 100mm이하인 경우에 틱새는 보통 0.3~0.6mm로 하며 직경이 0~1000mm인 경우에는 0.6~1mm로 한다. 틱새가 커지면 가공공차는 좀 더 크게 될 수도 있으나 위치센서를 위한 기준링의 공차는 정밀하여야 하고 특히 진원도가 높아야 한다.

(8) 회전속도(rotating speed)

마그네틱 베어링의 회전속도는 회전체의 불평형 질량에 의해 원심력 때문에 제한된다. 현재 “표준”적인 적층 회전자로서는 원주속도 12,000m/min과 구름베어링의 경우 온도상승으로 인한 제한 원주속도 2500~4000m/min에 비하여 매우 높은 것이다.

축 방향 베어링도 자체 원판의 원심력 때문에 표준장비로는 원주속도 2,100m/min 정도로 제약을 받게 되는데 이에 따라 지름이 약 4/7로 설계되는 반경방향 베어링의 원주속도는 12,000m/min으로 제약 받게 된다.

(9) 부하용량(load capacity)

능동형 마그네틱 베어링의 부하용량은 자철 재료, 회전자의 직경, 자기장의 폭에 따라 결정된다. 표준재료로서 최대 허용변압은 약 9 bar이며, 이것은 다른 일반 베어링에 비해 낮으나 고속 회전을 가능하게 하여 부하용량을 늘릴 수 있다. 현재의 기술로 베어링량의 최대 부하는 약 20톤이다.

(10) 소요동력(power consumption)

능동형 마그네틱베어링에서의 손실에너지는 첫째로 베어링에서의 히스테리시스와 전류에 의한 것이고 둘째로 전자회로에서의 줄효과 또는  $I^2R$ 손실에 의한 것이며, 비슷한 크기의 다른 베어링에 비해서 1/10~1/100의 동력손실이 있다. 어떤 경우에는 “water jacket”으로 냉각시켜 주기도 한다.

(11) 동력단절(power failure)

동력이 사고로 단절되었을 경우에는 필요에

따라서 밧데리 또는 엔진발전기로 회전체가 회전을 정지하는 동안에 필요한 전류를 공급하면 된다. 전자회로시스템의 보수는 계속 운전의 경우 평균적으로 약 40,000시간 또는 4~5년이다.

(12) 환경(environment)

마그네틱 베어링은 작업 환경에 그대로 설치될 수 있으므로 시일 및 관련요소와 열차단 장치가 필요없다. 현재 이 베어링은 공기, 진공, 헬륨, 탄산수소, 산소, 해유, 증기, 우라늄, 액체산소 및 헬륨등의 유체내에서 작동될 수 있고 온도는 -250℃ ~ +450℃에서 견딘다.

(13) 상시 고장 감시 장치(constant diagnostic monitoring)

상시 고장 감시 장치는 능동형 마그네틱 베어링에 있어서는 필수적인 장비이며 다음과 같은 신호가 항상 나타나야 한다.

- (가) 회전수
- (나) 각 베어링의 부하
- (다) 회전자 중심의 위치
- (라) 회전자 중심의 편심률
- (마) 회전체의 불평형

자동경보장치와 단절장치를 전자회로에 연결시키는 것도 필요하다.

(14) 축선 정렬(alignment)

처음에 회전축을 마그네틱 베어링에 평행하게 설치하는 것은 용이할 수 있다. 축이 회전하기 전에 마그네틱 베어링의 제어장치를 작동시키면 축은 관성 모멘트 중심선에 스스로 위치하게 된다. 그리고 나서 축심의 위치를 읽으면서 축의 열 팽창을 고려하여 중심선을 원하는 위치로 변경시킬 수도 있다.

4. 능동형 마그네틱 베어링에 지지된 회전축의 진동

기계식 베어링에 지지된 회전축의 진동은 기계요소의 강성 및 댐핑 특성이나 변형상태에 의해 미리 결정지워지나 능동형 마그네틱 베어링에 지지된 회전축의 진동은 전자제어계통을

통하여 정의되고 조절 및 제어되는 것이다. 특히 강성 및 댐핑특성을 제어함으로써 진동을 제어할 수 있으며 회전축심의 정확한 위치와 위험속도도 제어할 수 있다.

(1) 강성과 댐핑특성(stiffness and damping)

구름 베어링이나 오일 베어링에 지지된 회전축은 질량, 스프링, 댐퍼로 이루어진 진동 시스템으로 모델링 된다. 이러한 시스템의 가정은 그림 8에서 보는 바와 같다. 그러나 능동형 마그네틱 베어링-회전축계에 있어서는 강성 및 댐핑특성이 제어시스템에 의해 조절되며, 이때에 계의 교란주파수가 고려될 수 있다. 강성은 이득을 변화시켜 조절되며 댐핑특성은 제어회로의 위상각을 변화시켜 조절될 수 있다. 적분항을 추가함으로써 저주파 교란의 경우에 강성을 10배 내지 100배까지 증가시킬 수 있다. 그림 9는 능동형 마그네틱 베어링의 전형적인 강성을 보여주고 있다.

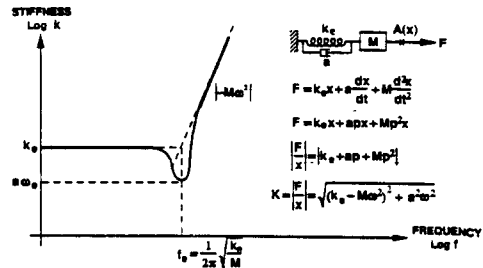


그림 8 일반베어링의 강성

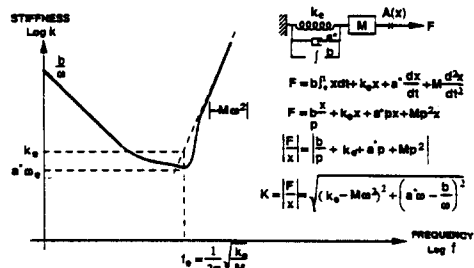


그림 9 마그네틱 베어링의 강성

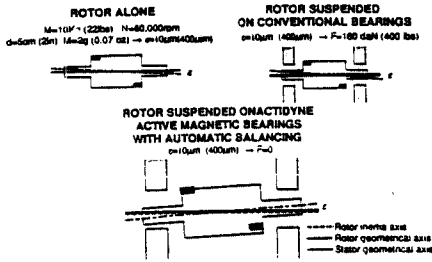


그림 10 자동밸런싱 시스템 원리도

예를 들어 어느 공작기계 스피들의 사양은 다음과 같다.

- 회전수 : 60,000rpm
- 회전체중량 : 10kg
- 베어링강성 : 동적강성 2.5kgf/ $\mu$ m  
정적강성 125kgf/ $\mu$ m
- 댐핑계수 : 0.5

또한 어느 원심 압축기의 사양은 다음과 같다.

- 회전수 : 10,000rpm
- 베어링강성 : 동적강성 5kgf/ $\mu$ m  
정적강성 500kgf/ $\mu$ m
- 댐핑계수 : 0.5

### (2) 자동밸런싱 (automatic balancing)

능동형 마그네틱 베어링에 지지된 회전축은 자동적으로 밸런싱이 되며 그림 10에 원리가 설명되고 있다. 일반적인 베어링은 회전축의 기하학적 중심선이 베어링 중심선에 평행되도록 작용하나 능동형 마그네틱 베어링은 회전축이 그 관성 모멘트 중심선을 축으로 하여 회전하게 한다. 따라서 회전축의 불평형 및 그로 인한 가진력은 저절로 제거되는 것이다. 기계의 운전시간이 증가함에 따라 부착물이 생기거나 부식되어 관성모멘트 중심선이 기하학적 중심선에서 어긋나게 되고 일반 베어링에 지지되었을 경우에는 심한 진동을 일으키게 된다. 그러나 능동형 마그네틱 베어링에 지지되어있는 경우에는 회전축이 항상 관성 모멘트 중심선을 축으로 하여 회전하기 때문에 기하학적 중심의 회전반경이 커질 뿐이지 위험한 진동현상은 나

타나지 않는다.

### (3) 회전 정밀도 (runout)

회전기계에 있어서는 회전축의 높은 정밀도를 요구하는 경우에 제어회로는 교란주파수를 고려하면서 강성을 현저히 높힐 수 있고 이에 따라 회전 정밀도의 수준이 높아질 수 있다. 보통의 경우 5 $\mu$ m는 쉽게 도달할 수 있으며 특수한 경우에는 0.05 $\mu$ m에 도달한 경우도 있다.

### (4) 위험속도 통과 (passing critical speed)

제어시스템은 운전자가 위험주도의 주파수 범위내에서 댐핑값을 조절할 수 있기 때문에 위험속도를 공진없이 쉽게 지나가 고속운전을 가능하게 한다.

## 5. 맺음말

마그네틱 베어링으로써 일반베어링의 사용시에 있었던 수많은 문제점들이 모두 해결되는 것처럼 보인다. 여러가지 특징 및 장점을 갖고 있으므로 가까운 장래에 회전기계 분야에 중요하게 사용될 것으로 판단된다. 그러나 받아들여질 수 없는 몇가지 요인들과 산업체에서 완전히 수용하기 이전에 좀 더 기술되어야 할 사항들은 다음과 같다.

- (가) 신뢰성 : 좀 더 연구할 필요가 있다.
- (나) 안정성 : 동적 안정성의 측면에서 연구되어야 한다.
- (다) 축방향 베어링 : 앞에서 설명한 바와 같이 원주속도의 한계치가 21,000m/min 이고 따라서 그보다 직경이 작은 반경방향 베어링의 한계 원주속도는 12,000 m/min가 된다.
- (라) 전기적 장애 : 고정자와 절연된 회전자 사이에는 방전이 일어나게 되고 이에 따라 포텐셜의 장애가 나타나게 된다.
- (마) 가격 : 크기가 작을 경우에는 일반 베어링에 비해 약 1.5배가량 비싸며 크기가 클 경우에는 약 80%가 된다. 그리고 운전비용은 일반 베어링에 비해 저렴하다.