

자기 베어링의 기술 현황 및 특성

장석명 권정기 조한욱  
충남대학교

Technology and Characteristic of Magnetic Bearing

S.M. Jang, J.K. Kwon, H.W. Cho  
Chungnam National Univ.

**Abstract** - There are many advantages of the Magnetic Bearing system, compared with conventional contacting bearing systems. Since the spindle in the Magnetic Bearing system is levitated by electro-magnetic forces and rotates without mechanical friction, it can run without lubrication. So, it can run in the extreme circumstances, e.g. a vacuum condition in the space.

1. 서 론

최근 회전기계류에 대한 세계적인 기술추세를 볼 때 고속화와 정밀화에 대한 요구가 한층 강조되고 있으며, 이러한 측면에서 자기 베어링에 대한 활용기술은 증대되고 있는 실정이다. 특히 프랑스를 중심으로한 스위스, 미국, 일본등이 이에 대한 연구를 활발하게 수행하여 고진공 터보분자펌프(TMP)를 비롯한 고속 공작기계용 주축계, 터보압축기 및 에너지 저장 플라이휠과 인공 심장 혈액 펌프 등에 활용시키는 단계에 와 있으며, 계속하여 일반 산업용에서부터 항공우주산업 및 바이오 산업에 이르기까지의 전 산업 첨단기술분야에 활용시키는 연구를 계속하고 있는 상황에 있다.

자기 베어링은 기계적인 마찰을 피할 수 있어서 보수 유지가 거의 필요없고 반 영구적 수명을 가지며 기존의 접촉식 베어링에 비하여 에너지 손실이 적은 장점이 있을 뿐만 아니라 회전체의 초고속 회전을 가능하게 하여 성능을 극대화할 수 있다. 또한 윤활이 필요없어 오염이 없고 진공 및 극저온이나 고온의 작업 영역에서도 사용이 가능하며 전기적인 제어에 의해 감시를 조절하고 자동 밸런싱등 성능 향상을 기할 수 있을 뿐만 아니라 운전중 회전체의 상태를 쉽게 모니터링 할 수 있는 등 많은 장점을 가지고 있다.[1].

본 논문에서는 자기 베어링을 부상 방식 및 제어 방식에 따라 분류하고, 각각의 특징과 응용처, 원리등에 대해 소개하고, 자기 베어링을 선정하는 방법에 대해서 언급하고자 한다. 또한 자기 베어링의 장단점 및 제어 방식에 대해서도 논의할 것이며, 유한요소해석법을 이용하여 자기 베어링에 대한 자체 분포를 분석하고자 한다.

2. 자기 베어링

2.1 작동 원리에 따른 자기 베어링

자기 베어링은 작동 원리에 따라 반발식과 흡인식, 능동 제어 유무에 따라 수동형과 능동형으로 나눌 수 있으며, 반발식은 영구 자석형, 와전류형, 초전도체형으로 다시 세분할 수 있다. 와전류형은 유도 부상력 혹은 플레밍력을 이용하는 것이고 초전도 자기 베어링은 초전도 마이스너 혹은 핀즈 효과를 이용하는 것으로 아직 상용 단계에는 이르지 못하고 있다. 또한 영구 자석형은 영구 자석의 배치를 어떠한 방법으로 하여도 전체 축이 안정한 부상은 실현할 수 없다는 연소우의 정리에 따라

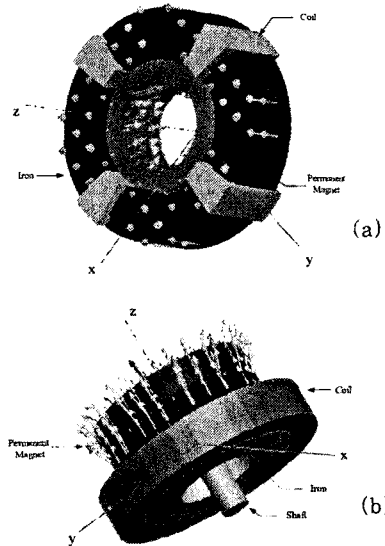


그림 1. 호모폴라형 자기 베어링 (a) One-PM Prototype bearing (b) Two-PM Prototype bearing

서 최소한 1축 이상은 전자 제어되는 흡인식 자기 베어링을 포함해야 안정된 작동을 할 수 있다. 따라서 각각의 자기 베어링에 대한 자기적 특성 연구가 선행되어야 한다.

2.1.1 호모폴라형 자기 베어링(HMB)

호모폴라형 자기 베어링은 정하중지지 능력은 영구자석이 담당하고 전자석은 제어력을 발생시키는 것으로 에너지 소비를 최소화하는 방법이다. 그림 1은 최근에 연구되고 있는 호모폴라형 자기 베어링을 도시한 것으로 그림 1(a)는 원형의 영구 자석에 자성체를 샌드위치 형태로 배치 하였으며, 제어를 위한 코일을 토로이달 형태로 감아 각 사분면에 배치시켰다. 축은 링 형태의 자성체를 가지고 있으며 영구 자석은 z-방향으로 자화되어 있고 코일은 맞은편 코일과 직렬 접속되어 있다. 영구 자석에 의한 dc 바이어스 자속은 상단의 자성체를 따라 원 중심으로 이동하여 회전자를 쇄교하고 하단의 자성체로 돌아오는 폐루프를 그리며, 코일에 의한 ac 제어 자속은 원형의 자성체를 따라  $\pi$ 만큼 회전한다. 그림 1(b)는 네 개의 원형 영구 자석을 사용한 자기 베어링으로 전체 자기 베어링의 반만을 도시한 것이다. 각각의 영구 자석은 z-방향으로 자화되어 상호간 흡인력이 작용하도록 설계되어 있으며, 상단의 영구 자석이 축과 연결되어 있다. 이 모델의 경우 축방향 제어를 위해 dc 전자석 액츄에이터를 사용하였으며, 영구 자석의 자속을 가감하는 방식으로 제어를 수행한다.

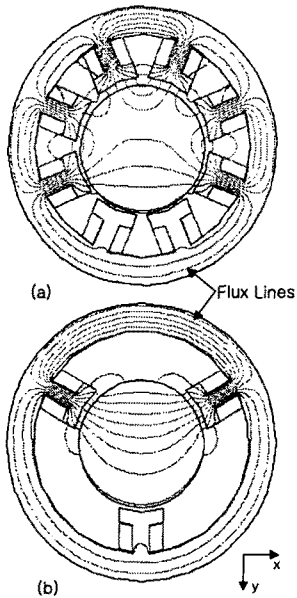


그림 2. 능동형 자기 베어링 (a) 8-Pole AMB System (b) 3-Pole AMB System

### 2.1.2 능동형 자기 베어링(AMB)

능동형 자기 베어링은 정하중지지 능력과 제어를 모두 전자석에 의해 이루어진다. 그림 2는 능동형 자기 베어링을 도시한 것으로 회전자가 y-방향으로 1만큼 이동되었을 경우에 부상을 위한 자속의 흐름을 도시한 것이다. 그림 2(a)는 능동형 자기 베어링의 가장 일반적인 모델로 8극으로 이루어진 자기 베어링이다. 이 경우 네 개의 독립적 코일을 각각의 전력 증폭기로 제어하게 된다. 그림 2(b)는 최근에 연구되고 있는 3극형 모델로 부상 및 제어를 위한 최소의 극수로 이루어져 비용을 절감시켰다. 8극형과 비교하여 3극형 자기 베어링은 세 개의 전력 증폭기만으로 충분히 제어할 수 있으며, 경우에 따라 두 개 전력 증폭기를 사용할 수도 있다. 또한 소자되는 주파수를 절반으로 줄일 수 있어 회전자의 철손을 감소시킬 수 있고, 공간이 확보되어 냉각과 코일 설치가 용이하다. 하지만 3극형 자기 베어링의 가장 큰 단점은 코일에 의한 자속이 독립적이지 않아 힘 특성이 비선형적이고, 따라서 제어가 어렵다.

### 2.1.3 수동형 자기 베어링(PMB)

그림 3은 최근에 일본의 카나자와 대학교에서 연구되고 있는 수동형 자기 베어링을 도시한 것으로 영구 자석간의 반발력을 이용하여 축방향 또는 반경방향에 대해 부상력을 얻고, 능동형 자기 베어링을 이용하여 제어력을 얻는다. 그림 3(a) 수평 방향 축을 갖는 기기를 위해 고안된 자기 베어링으로 축의 양단에 설치하여 반경 방향의 정하중지지를 위한 부상력을 얻는다. 또한 축방향 제어를 위해 축의 중앙에 능동형 자기 베어링을 설치하여 제어를 수행한다. 사용된 영구 자석은 모두 z-방향으로 자화되어 있으며, x-방향은 중력의 방향으로 이를 지지하기 위해 하단의 영구 자석이 상단보다 크게 설계되어 있다. 이 모델에서 상단의 영구 자석은 축의 진동을 억제하는 역할을 하게 되며, 각도가 45°인 경우에 가장 좋은 특성을 보이는 것으로 알려져 있다. 그림 3(b)는 수직 방향 축을 갖는 자기 베어링을 위해 고안된 것으로 외부 및 내부에 z-방향으로 자화된 원형 영구 자석을 사용하고 있다. 내부 영구 자석이 정 중앙에 위치할 경우 축의 반경방향 힘은 0이 되어 안정적이지만, 축이 xy평면의 어느 위치로 이동하게 되면 두 영구 자

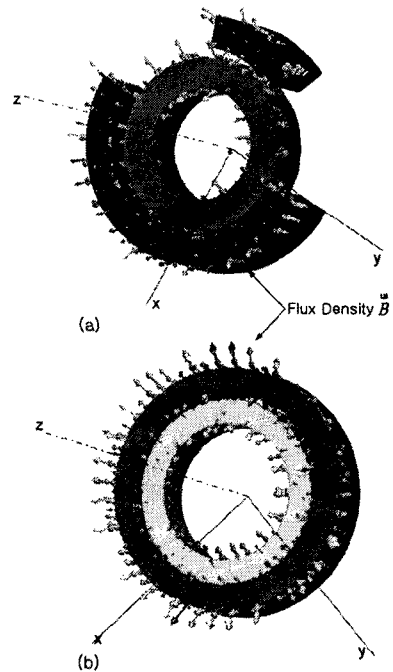


그림 3. 수동형 자기 베어링 (a) Horizontal-Shaft Type (b) Vertical-Shaft Type

석간의 거리차가 발생되고, 자기 저항 값이 변하게 되어 공극 자계에 변화가 일어난다. 이러한 공극 자계의 변화분이 복원력으로 작용하여 축은 항상 외부 영구 자석의 중앙에 위치하려고 한다. 하지만 축이 z-방향으로 이동하면 진행 방향으로 힘이 작용하여 안정적이지 못하다. 따라서 축 중앙에 능동 자기 베어링을 설치하여 제어하게 된다.

### 2.1.4 와전류형 및 초전도체형 자기 베어링

와전류형 자기 베어링은 계자원과 도체의 상대 운동에 의한 유도 부상이다. 계자원이 도체에 대해 속도  $v$ 로 이동하면 도체내에 와전류가 발생하여 제동력과 수직력이 발생한다. 이 중에 수직력을 이용하여 부상시키는 것으로 어느 정도 속도가 없으면 부상할 수 없다는 것과 와전류손, 제동력등의 손실이 발생하여 효율이 안 좋은 단점을 가지고 있다. JR의 부상 철도는 이 방식의 발전형으로 와전류형 자기 베어링의 단점을 보완하는 연구가 진행중이다.

초전도체형 자기 베어링은 크게 두가지의 방식에 의해 부상력을 얻는다. 하나는 초전도체의 완전 반자성 영역, 즉 마이스너 영역을 이용하여 자속의 반발력에 의해 부하를 지지하는 방식으로 이것을 마이스너 부상이라고 부른다. 다른 하나는 제 2종 초전도체의 내부에 자속을 침투시켜 초전도체에서 자속의 핀 정지력에 의해 부하를 지지하는 방식이다. 이것을 핀 정지 부상이라고 부르고 자속이 영구 자석에서 방사선으로 분포하고 있는 경우에는 전자 유도에 의해서 지지력이 작용하고, 표면에 대해 직각의 방향으로 균일한 자장이라면 그 방향에는 힘이 작용하지 않아 리니어 가이드에 응용할 수 있다.

### 2.2 자유도에 따른 자기 베어링

자기 베어링의 자유도는 병진 운동에서 3축과 회전 운동에서 2축을 합쳐 모두 5축 제어가 필요하다. 하지만 5축 능동형 자기 베어링 시스템은 모든 제어축을 전자 제어하기 때문에 강성이 크고 동특성의 조정이 유리

한 반면 제작 비용이 많이 들고 제어 회로가 복잡한 관 계로 반복 사용시 신뢰성이 낮아질 수 있다. 그러므로 가능하면 능동 제어축을 영구 자석을 이용한 수동형 자기 베어링 시스템으로 대체시키는 노력이 필요하다. 표1에서 제어 축수에 따른 자기 베어링의 종류 및 현재 실용화 되고 있는 응용 분야를 나타내었다.

표 1. 자유도에 따른 자기 베어링의 분류 및 응용 사례

제어 축수	병진 운동			회전 운동		특징	응용사례
	x	y	z	x	y		
1				○		제어회로가 최소, 신뢰성 우수함. 마찰 토르크가 작다.	우주용기기
2	○	○				축이 짧은 평판형에 유리 구조가 간단하고 조립이 용이	우주용기기
3	○	○	○			고속 회전용으로서 최소 제어축수	터보 분사펌프
				○	○	Gimbaling이 가능	우주용 기기
4	○	○		○	○	조립이 비교적 용이 Gimbaling이 가능	터보 분사펌프 플라이휠
	○	○	○	○	○	제어회로가 복잡 베어링 강성이 큼 베어링 특성 조정 용이	원심분리기 기타 터보기기

### 2.2.1 모델화와 제어

제어시스템의 구성을 위하여 자기 베어링에 대한 모델화와 제어계의 설계가 선행되어야 한다. 따라서 그림 2(a)의 일반적인 능동형 자기 베어링의 인접한 두 극에 대한 모델화와 제어계의 설계를 하고자 한다.

자기 회로망을 이용하여 자기 회로를 통과하는 자속은 식(1)과 같다.

$$\Phi = \frac{Ni}{\frac{l}{\mu_0\mu_s S} + \frac{2x}{\mu_0 S}} = \frac{\mu_0 S Ni}{\frac{l}{\mu_s} + 2x} \quad (1)$$

여기서  $x$ 는 공극의 길이이며  $l$ 은 자로의 길이,  $S$ 는 단면적,  $\mu_s$ 는 철심의 비투자율이다. 식(1)로부터 자속 밀도는 식(2)와 같이 유도된다.

$$B = \frac{\mu_0 Ni}{\frac{l}{\mu_s} + 2x} \quad (2)$$

또한 흡인력은 식(3)과 같다.

$$f_m = \frac{B^2}{2\mu_0} 2S = \frac{N^2 \mu_0 S i^2}{\left\{ \frac{l}{\mu_s} + 2x \right\}^2} = k \left( \frac{i}{x + X_0} \right)^2 \quad (3)$$

또한 인덕턴스는 식(4)와 같다

$$L = \frac{N^2 \mu_0 S}{i/l + 2x} + L_0 = \frac{Q}{x + X_0} + L_0 \quad (4)$$

여기서  $x$ ,  $X_0$ ,  $Q$ 는 상수이고,  $L_0$ 는 누설 자속이다. 이제 상태방정식을 도출해 보자. 부상 물체에 중력과 외력  $f_d$ 가 중력의 방향으로 작용한다면, 흡인력  $f_m$ 은 식(5)를 만족해야 한다.

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = mg - k \left( \frac{i}{x + X_0} \right)^2 + f_d \quad (5)$$

등가 전기 회로 방정식은 식 (6)과 같다.

$$e = \frac{d}{dt} Li + Ri \quad (6)$$

이상의 식을 정리하면 이 계에서 성립하는 기본식을 얻는다.

$$v = \frac{dx}{dt}$$

$$m \frac{dv}{dt} = mg - k \left( \frac{i}{x + X_0} \right)^2 + f_d \quad (7)$$

$$e = - \frac{Q}{(x + X_0)^2} iv + L \frac{di}{dt} + Ri$$

### 2.3 자기 베어링의 연구 방향

자기 베어링 사용의 최대 저해 요인인 제작 및 운전비용을 줄이기 위하여 수동형 자기 베어링의 개발과 제어축의 자유도를 줄임으로서 필요한 하드웨어의 최소화가 이루어져야 한다. 또한 고가의 변위센서를 저가의 전류센서로 대체하는 Self-Sensing 자기 베어링 개발이 이루어져야 하며, 자기 베어링을 모터에 응용할 경우 베어링 없이 구동하는 Bearingless Motor 개발이 이루어져야 할 것이다.

### 3. 결 론

자기 베어링은 미국 버지니아대 Beams에 의해 최초로 제작된 이후 전력 소자 및 제어기의 발달과 함께 눈부신 발전을 거듭하고 있다. 또한 안정된 부상력을 얻기 위해 다양한 전자기적 원리가 적용되고 있고, 상용화를 위해 많은 연구가 이루어지고 있다. 따라서 본 논문에서는 최근 연구되어지는 다양한 자기 베어링을 소개하였고, 앞으로의 연구 방향을 제시하였다.

### [참 고 문 헌]

- [1]일본기계학회편, 이동주, 홍준희, 박종권공역, "자기베어링의 기초와 응용", 시그마프레스, 2001
- [2]통상산업부, "플라이휠 에너지 저장기술 개발에 관한 최종 보고서", 1997.12.
- [3]Perry Tsao, Seth R. Sanders, Gabriel Risk, "A Self-Sensing Homopolar Magnetic Bearing: Analysis and Experimental Results", Industry Applications Conference 34 IAS Annual Meeting, IEEE, Vol.4 pp.2560-2565, 1999
- [4]Isaias da Silva, Oswaldo Horikawa, "An Attraction-Type Magnetic Bearing with Control in a Single Direction", Industry Applications IEEE Transactions on, Vol. 36, pp. 1138-1142, Jul/Aug 2000
- [5]Shyh-Leh Chen, Chan-Tang Hsu, "Optimal Design of a Three-Pole Active Magnetic Bearing", Magnetics, IEEE Transactions on, Vol. 38, pp. 3458-3466, Sep, 2002
- [6]T.Ohji, S.C. Mukhopadhyay, M. Iwahara, S. Yamada, "Performance of Repulsive Type Magnetic Bearing System under Nonuniform Magnetization of Permanent Magnet", Magnetics IEEE Transactions on, Vol. 36, pp. 3696-3698, 2000
- [7]S.C. Mukhopadhyay, T.Ohji, M. Iwahara, S. Yamada, "Design, analysis and control of a new repulsive-type magnetic bearing system", Electric Power Applications, IEE Proceedings, Vol. 32 pp. 33-40, Jul, 1999