

고정밀 자기베어링의 제어 및 응용 기술



이 찬 흥

한국기계연구원 공작기계그룹



노 승 국

한국기계연구원 공작기계그룹

첨단 공작기계 및 산업기계에서 회전체와 이송계의 고속화에 대한 요구는 장비의 고성능화와 맞물려 급격히 증대되고 있다. 기존 구름베어링 축지지의 대안으로 여러 가지 특수 베어링들이 여러 분야에서 모색되고 있다. 그중 자기부상을 이용한 비접촉의 마그네틱 베어링을 이용하면 초고속 영역까지 높일 수 있는(최대 400만 DmN) 장점과 자기베어링 내부의 물리적 특성을 수시로 변화가 가능하므로 최근 들어 각국에서는 이의 활용을 위한 기술개발이 매우 활발하다.

자기베어링의 역사는 1831년 Faraday의 전자유도 발견 후, 1841년 Earnshaw의 이론 "정자계를 어떠한 방법으로 배치하여도 안정한 부상을 이룰 수 없다"를 발표하였고, 최초의 자기베어링 성공은 1937년 버지니아 대학의 Beams, Black & Holmes에 의해 만들어진 1축 자기부상계로 약 0.4mm의 강구를 부상시켜 80만 RPM까지 회전시킨 것으로 알려져 있다. 그러나 본격적인 자기베어링의 역사는 1976년에 프랑스에 자기베어링 전문 회사(S2M)가 설립되면서부터라 할 수 있으며, 국내에서는 1980년대부터 학계를 중심으로 연구가 시작되어 90년대 중반 부터는 국내산

업의 실용화 요구에 따라 국책 연구소를 중심으로 하여 적용연구가 활발히 진행중에 있다.

이러한 자기베어링은 부상방식에 따라 크게 초전도체를 이용한 방식과 상전도 흡인식 혹은 기타 유도 부상형이나 반발식으로 나눌 수 있으며, 일반적인 산업계에는 상전도 흡인식이 주로 적용되고 있다. 흡인식 자기베어링의 원리는 그림 1과 같이 간략화 될 수 있는데, 즉 자성체(축)를 대응되는 자석의 자기력을 조절하여 일정한 위치로 유지시키는 것이다. 자기력은 대응면을 통과하는 자속의 세기의 제

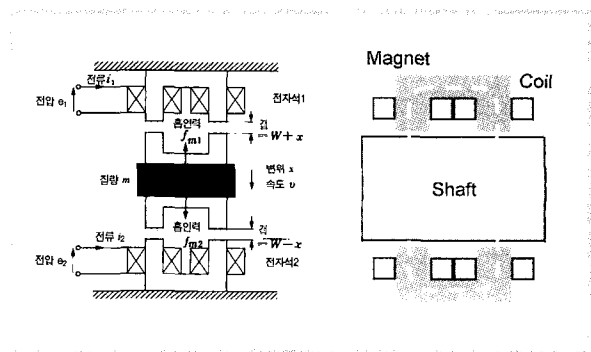


그림 1. 자기부상 원리

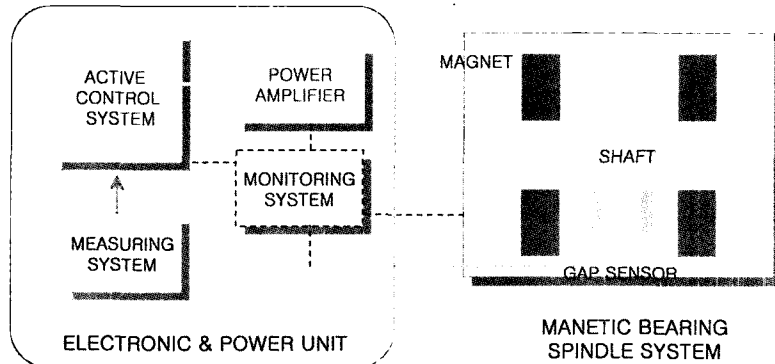


그림 2. 자기베어링 시스템의 구성

곰에 비례하며, 자속은 자성체와 전자석간의 간격(Air gap)에 반비례하고 자화력(Magnetomotive force)에 비례하는 특성을 가지고 있다. 이러한 자기력의 특성 때문에 자기베어링의 역할을 위해서는 단순한 전자석 자체만으로는 비접촉 부상이 불가능하며 능동제어를 통한 위치제어가 필수적이게 된다. 따라서 일반적인 자기베어링 시스템은 다음과 같이 전자석, 변위 측정 센서, 제어기 및 전력 증폭기로 구성된다(그림 2).

이러한 자기베어링의 장점으로는 부상을 통한 비접촉 특성으로 고속화가 가능하다는 점을 우선 들 수 있다. 즉 기계적인 마모나 마찰이 없으므로 윤활이 필요 없어 반영구적인 수명을 갖으며 공기마찰이 없는 진공에서는 마찰손실

이 없다. 허용 원주속도는 200m/sec, DmN치로는 약400만까지 가능하다. 또한 윤활이나 유막형성을 위한 유체가 필요하지 않으므로 고진공이나 극저온 혹은 고압환경등 극한환경에서 별도의 밀폐장치 없이 사용이 가능하여 우주산업이나 극한기술에 적용하기 용이하다. 또 다른 장점으로 자기베어링에 필수적인 능동제어 시스템에 의해 얻어지는 것들을 들 수 있다. 즉, 제어기의 특성 설계에 따라 강성과 고유진동수, 감쇠 등 정, 동적인 특성을 조절할 수 있으며, 센서와 제어시스템의 정밀화를 통하여 초정밀 특성의 구현도 가능하다. 회전체에서 발생하는 언밸런스, 외부 진동 등을 능동적으로 제어하여 자동 밸런싱 기능이나 진동 제거 기능등을 구현할 수 있다. 또한, 전류 변위 등의 변수

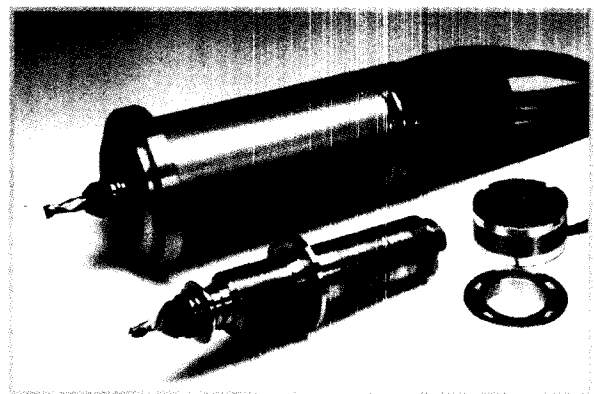
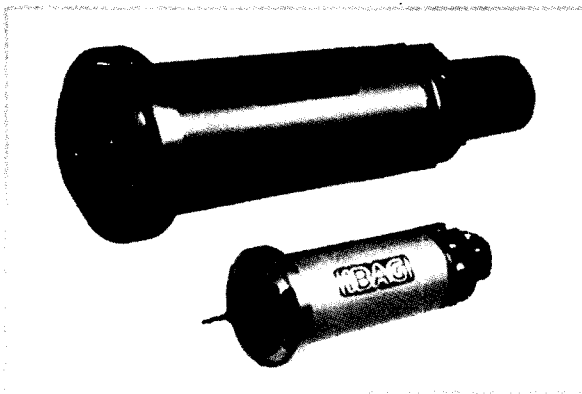


그림 3. 자기베어링을 이용한 공작기계용 주축계 (좌: IBAG 스위스, 우: S2M 프랑스)

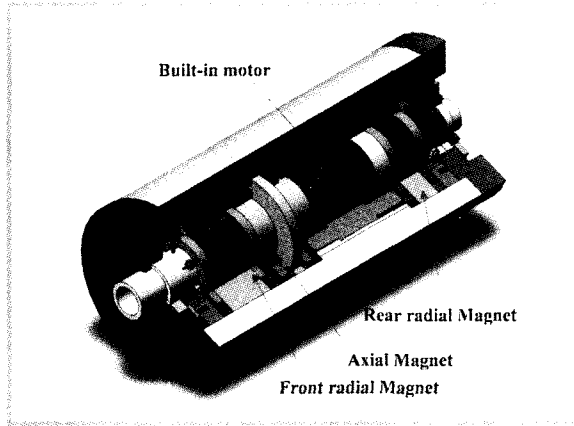


그림 4. 국내에서 개발중인 고속 자기부상형 밀링 주축 (50,000 rpm, KIMM, (주)성림)

들이 측정 가능하므로 회전체나 기계상태를 모니터링하여 측정할 수 있고, Fail-Safe 제어기법 등을 사용하여 신뢰성을 증가시켜 사용수명을 연장할 수 있다. 물론, 자기베어링에 장점만이 존재하는 것은 아니다. 가장 큰 단점으로는 초기 투자비가 상대적으로 고가(高價)라는 점인데, 이는 베어링 하드웨어 외의 센서, 앰프, 제어기와 같은 기타 전자장치들의 가격이 여타 베어링시스템에 비하여 많은 비용을 요구하고 있기 때문이다. 또한 하중 능력이 기존의 베어링보다 작은 점도 들 수 있는데, 자성재료의 한계에 따라 약 $1\text{kg}/\text{cm}^2$ 정도로 볼베어링의 경우의 약 1/100 정도의 수준이다. 이러한 단점들은 여러 가지 기반 기술의 발전에 따라 해결되어지고 있고 현재에도 자기베어링은 여러 분야에서

필수적으로 사용되고 있으며 앞으로 적용범위가 계속 커질 것으로 기대되고 있다. 공작기계분야에 있어서의 자기베어링에 대한 응용기술은 우선 주축계를 꼽을 수 있다. 자기베어링을 이용한 공작기계 주축계는 스위스(IBAG), 일본(SEIKO-SEIKI), 미국(AVCON), 프랑스(S2M) 등에서 이미 판매되고 있으며, 그 종류도 고속 내면 연삭기주축, 고속 가공용 밀링스핀들 주축 (HSK-25~63), 드릴링 및 고주파 주축 등이 있다. 그림 3에는 스위스와 일본에서 출시된 주축들이 있고, 국내에서 개발된 공작기계용 주축계는 그림 4 및 그림 5에서 보여준다. 대부분의 공작기계 주축계는 2쌍의 반경방향 자기베어링이 위치해 있고 축방향 자기베어링과 내장형 모터로 이루어져있어 5축 능동제어 시스템으로 구성되어 있으며 특히 그림 5의 내면 연삭기 주축계는 원추형 자기베어링을 이용하여 축방향 전자석이 없는 간략한 형태를 갖고 있다.

이밖에 공작기계 분야 이외의 산업계에서의 자기베어링의 활용도는 더욱 넓다. 특히 터보기계 분야는 자기베어링의 개발 시초부터 가장 많은 적용 분야로 각종 터빈과 압축기, 원심 분리기 등 고속회전분야에 적용되어 왔다. 그중 가장 보편화 된 제품으로는 터보 분자펌프(Turbomolecular Pump)를 들 수 있는데, 고진공의 요구 따라 고속이 요구되고 따라서 최근 외국의 우수 진공장비 업체에서는 기존의 볼베어링이 아닌 자기 베어링을 이용한 자기부상형 Turbo분자펌프($10e-08$ Torr)가 개발되어 사용함으로써 고집적 반도체 생산을 실현시키고 자기베어링형은 기존의

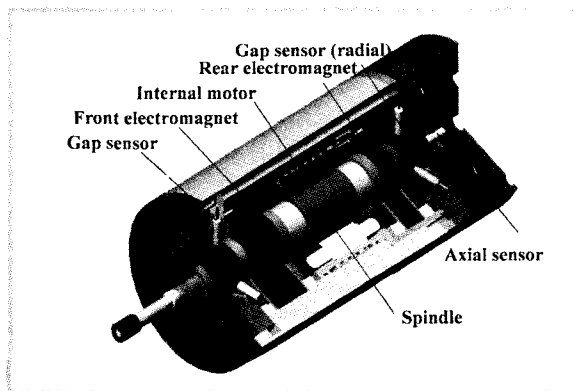
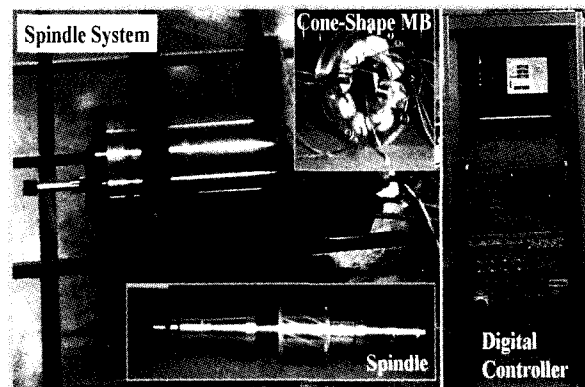


그림 5. 원추형 자기베어링 이용 내면 연삭기 주축계(50,000 rpm)



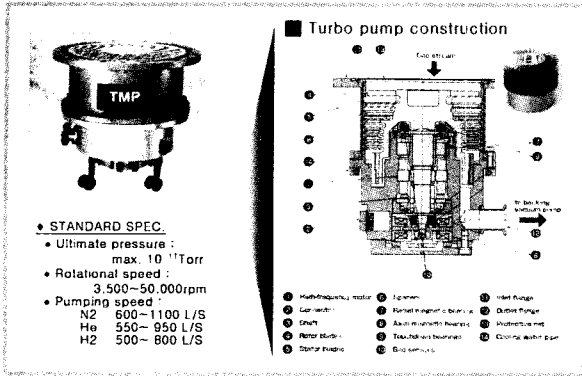


그림 6. 자기부상 터보분자펌프 (SHIMADZU, 일본)

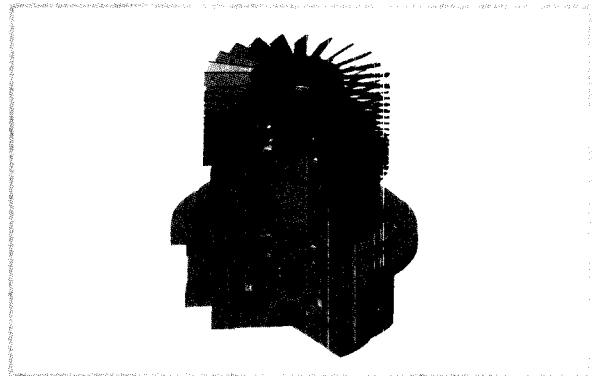


그림 7. 고진공 터보펌프용 자기부상 구동 시스템 (40,000 rpm)

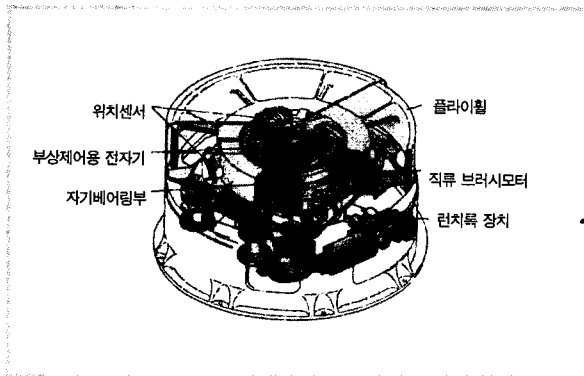


그림 8. 우주실험용 자기베어링 플라이휠

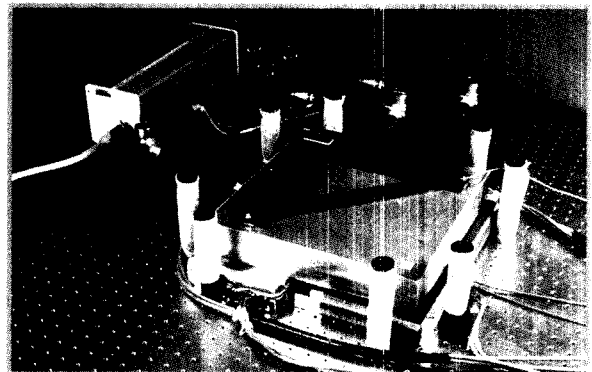


그림 9. 초정밀 6축 자기부상 스테이지 (MIT, 미국)

볼베어링형의 터보펌프들을 빠르게 교체하고 고진공 펌프의 주력으로 자리잡고 있다. 그림 6은 자기베어링을 이용한 터보분자펌프(TMP)의 개념도와 국내에서 개발중인 자기베어링을 이용한 TMP시스템의 그림을 나타내고 있다(그림 7).

또 한가지 분야로는 고에너지 저장 플라이휠 시스템이다. 플라이휠의 고에너지 저장을 위해서는 고속회전이 필요하므로 저마찰과 진공중 사용가능한 자기베어링의 사용이 가장 적합하다. 이러한 플라이휠은 UPS등의 전원보상용이나 순간 고출력을 위한 전기자동차 등 일반 및 군수 산업과 인공위성의 자세제어용 모멘텀 휠 등 항공우주 산업에 이용되고 있다.

자기베어링은 회전체 뿐 아니라 직선 운동기구에도 적용

되고 있으며 자기부상 열차가 가장 대표적인 예라 할 수 있다. 운송분야가 아닌 산업계에서는 자기부상을 이용한 스테이지나 청정 이송장치 등에 자기베어링이 적용되고 있다. 특히 자기베어링을 이용한 정밀 스테이지는 비접촉으로 인한 정밀 위치결정이 가능하다는 점과 외부 진동에 강인하다는 점, 그리고 진공에서 작동이 가능하다는 점 때문에 반도체 및 나노테크 가공장비의 스테이지에 활용되고 있다(그림 9).

따라서, 자기베어링 시스템은 정밀산업에 많은 장점을 가져다주기 때문에 최근 들어 활용도는 계속 증가되고 있으며 이에 국내에서도 공작기계산업 뿐만 아니라 반도체 산업을 비롯하여 바이오산업 및 항공우주산업 등에도 활용을 하기 위한 연구를 수행 중에 있기도 하다.