# Special Thema | 초전도 벌크를 이용한 베어링기술

**최용성** 교수
(동신대 전기공학과)
**이상헌** 교수
(선문대 전자공학부)

## 1. 서 론

초전도 베어링 기술은 높은 에너지 출력 밀도, 반영구적인 수명, 환경 친화성 등의 장점에 힘입어 전기에너지 응용 기술 분야의 새로운 장을 열어가고 있다.

베어링은 동력장치 등에서 회전체의 관성을 늘리고 균형을 이루며 주기운동을 부드럽게 유지하기 위해 사용되어 왔고, 현재에도 각종 동력기기 등에 필수적으로 쓰이고 있다. 베어링 기술에서는 회전자의 동작중에 필연적으로 발생하는 에너지 손실을 최소화하는 것이 필수적인 요소기술로서 매우 중요하다. 이 기술은 회전부와 고정부의 기계적 접촉을 배제하는 무접촉 베어링 기술로서 전자석을 이용하여 회전체의 위치를 능동적으로 제어하는 자기베어링과 고온초전도 벌크를 이용하는 초전도 베어링으로 크게 나눌 수 있다.

능동 자기베어링은 정 • 동적인 특성을 임의로 조절할 수 있다는 장점이 있는 반면에 계속적으로 전력이 소모되고 별도의 제어장치가 필요하며, 급작스런 고장 발생에 대비해 신뢰성을 확보하기 위해서는 제어모듈을 중복적으로 설치해야 하는 단점이 있다. 한편 초전도베어링은 베어링의 강성, 감쇠력 등을 임의로 조절하기가 매우 어렵다는 단점은 있으나 고온초전도체의 냉각상태에 의하여 베어링이 작동되므로 기술의 신뢰성이 매우 높고 제어장치가 필요 없으며 초전도체의 냉각유지에 필요한 정도의 에너지만 소모된다는 장점이 있다.

이 글에서는 초전도체를 이용한 Mechatronics에 대해 간략히 소개하고자 한다.

## 2. 초전도 베어링의 특징

초전도 베어링은 일반적으로 영구자석을 포함하는 회전자와 고온초전도 벌크로 구성된 고정자로 이루어진다. 회전자를 평행한 위치에 두고 고온초전도체를 냉각시킴으로써 회전자에서 발생한 자속이 고온초전도체

내부에 일부 고정되어, 회전자가 평형 위치에서 이동할 경우 발생하는 복원력으로 베어링으로서의 역할을 하게 된다.

고온초전도 벌크의 베어링고정자로서의 성능은, 자속을 내부로 포획시켜 사용하는 방법과 초전도체의 반자성에 의한 자속 배척을 이용하는 방법 등이 초전도체의 자기장 포획능력으로서 평가될 수 있다. 고온초전도 벌크의 최대 포획 자장을 증가시키는 방법은 초전도체 단결정을 대면적화 하는 방법과 내부 미세구조 등을 인위적으로 조절하여 자속 고정력을 향상시키는 방법이 있다. 이 중 대면적화에 의한 효과는 외부에서 제공되는 자기장이 충분히 강할 경우 최대 포획자장이 단결정의 최소 반경에 비례하며, 이러한 경우 발생될 수 있는 자기력도 초전도체의 총 면적이 같을 때 단결정의 반경에 비례하게 되는 것으로 설명할 수 있다. 단 유의해야 할 점은, 초전도체를 2차원적으로 볼 때 초전도체 내부 한 지점의 자속 포획량은 자기장에 수직방향인 초전도체 외부의 비초전도 영역과의 거리에 따라 결정된다는 것이다. 또한 비초전도 영역이 초전도 영역의 내부에 존재할 경우에는 형상 기하적인(Topological) 이유로, 이를 내부의 자속밀도가 균일한 하나의 큰 자속 고정점으로 보아야 할 것이다. 최근 국내에서도 진행되고 있는 다중 종자에 의한 대면적 결정성장 연구도 위와 같은 특성을 잘 이용하여 좋은 결과가 나올 수 있을 것이라고 기대된다.

한편, 고온초전도체의 자속 고정력 향상에 의한 효과는 작은 반경의 단결정에서도 더 높은 포획자장을 얻을 수 있다는 것으로, 특히 베어링 회전자 자기장의 비대칭성과 회전자의 진동 등에 의해 발생하는 자기장 변화에 의한 초전도체 내부의 자속이동을 줄여 베어링의 특성을 더 좋게 할 수 있다는 점이다. 초전도체 내부의 자속이동은 초전도체 내에서 발생하는 비가역손실(Hysteresis Loss), 회전자의 평형위치 이동(Levitation Drift) 등을 유발시킨다. Hikihara와 Moon은 고온초전도체의 비가역 자화 특성에 의해 발생한 초전도베어링의 혼돈적(Chaotic) 동특성을 측정 분석한 바 있다[1]. 또, Hikihara 등은 중량 456 g의 시험용 회전체를 MPMG-YBCO 위에서 회전시켜 평형위치이동 측정을 한 바 있다[2]. 이 실험의 결과를 참고하여 현실적인 플라이휠 베어링에 대해 유추하기엔 미흡한 점이 많으나, 최근에 제조되고 있는 고품질의 초전도 단결정들은 상당히 강한 자속 고정력을 가지고 있어 플라이휠 베어링에 적절하게 사용 가능하리라 본다.

고온초전도 베어링에서 회전자 영구자석으로는 주로 Nd-B-Fe 자석을 사용한다. 이 종류의 자석은 잔류자속밀도(Br)가 1.1 ~ 1.3 T 정도이고, 보자력(Hc)은 상온에서 14 kOe 정도이며 온도 변화에 따른 보자력의 변화도 커서 -40 ℃ 정도에서 24 kOe에 달하게 된다. 그러나 이 자석으로 이루어진 일반적인 베어링 회전자에서 고정자 고온초전도체에 가하는 자기장은 자기 저항(Magnetic Resistance)에 의한 감자 효과로 인해 수천 가우스 정도로 제한된다. 이 정도의 자기장은 초전도 단결정 YBCO의 성능 한계에 못 미치므로 고온초전도 베어링의 하중 지지력과 강성을 제한하는 큰 요인이 되고 있다. 따라서 영구자석의 자속 경로를 효율적으로 구성하여 초전도체에 가해지는 자기장을 강화하는 방안이 여러모로 고안되었다. 이 방안들은 대체적으로 자석의 극 배열을 조정하여 자기장과 고온초전도체와의 상호 작용을 극대화하는 방법과, 자속 경로를 강자성체로 구성하여 자기 저항을 줄이는 방법을 혼합한 것으로, 적용 대상인 플라이휠 장치의 구성에 따라 다양함을 보인다.

## 3. 자기 부상 기술

비접촉베어링은 초전도체를 간단하게 이용할 수 있는 기술로 여겨진다. 초전도베어링의 개발에 있어서 비접촉 베어링은 전력저장용 Flywheel에 대한 고속, 극 저마찰로 회전시키면서 필요한 때에 회전에너지를 부속의 발전기를 통하여 전력으로 변환하는 구조로 구성된다. 이 구조은 그림1에 제시된 것과 같이 회전체 하부에 고자력 초전도체와 영구자석을 설치하여 비접촉 베어링을 구성하고 축방향과 반경방향으로 발생하는 미세한 흔들림은 능동형 자기베어링으로 억제한다. 회전 시 마찰저항을 줄이기 위하여 회전부 주변은 0.27 Pa이하의 진공을 유지하나

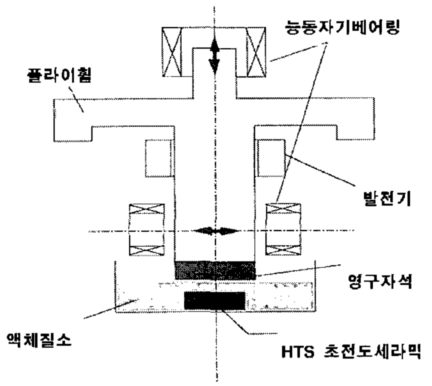



그림 1. 초전도 플라이휠의 개념도.

소비전력과 능동자기 베어링의 소비전력을 고려한 시스템 전체의 고효율화가 기대된다.

## 4. 리니어 액츄에이터

액츄에이터란 가동에너지(전기에너지)를 기계적인 변위 또는 응력으로 변환하는 트랜듀서로서 모터나 에어실린더, 유압실린더, 피에조(압전소자) 등 동력을 발생하는 장치를 뜻한다. 액츄에이터에는 다양한 종류가 있는데, 모터의 구동에 의하여 큰 동력을 발생하는 것과 모터를 수반하지 않고 신축 동작을

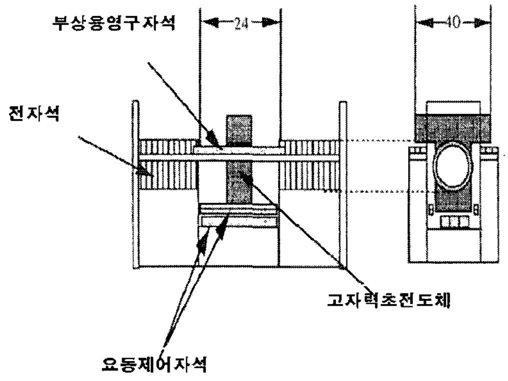



그림 2. Linear Actuator의 구조.

하는 것이 있다. 초전도체를 이용한 리니어 액츄에이터는 반도체 IC 제조공정과 같이 마찰분말을 배제하는 현장의 반송장치 또는 Micro 위치제어장치 등에 응용할 수 있다. 그림2에는 리니어 액츄에이터의 구조를 나타낸다.

이 구조는 T자형의 세라믹 초전도체를 부상용의 휘토류 영구자석의 레일 위에 설치하여, 양쪽에 위치한 전자석에 의해서 초전도체의 위치를 제어할 수 있도록 구성한 장치이다. 초전도체의 수직평면내의 요동을 억제하기 위하여 세라믹 초전도체 하부에 요동제어자석을 배치한다. 액츄에이터의 위치제어는 0.05 ㎜의 정밀도를 나타낸다.

액츄에이터의 제1 근사운동방정식은 다음과 같다.

$$\frac{m\,d^2x}{d\,t^2} + \frac{cdx}{dt} + kx = F(x, i) \qquad (1)$$

여기서, $m$은 세라믹 초전도체의 질량, $c$는 액체질소의 점성저항계수, $k$는 부상자석의 자계가 된다.

액츄에이터의 제어가 곤란한 점은 반발력 $F$가 전자석전류 $i$에 대하여 Hysteresis를 갖는 점과 $k$가 전류값에 크게 의존하고 있는 점을 들 수 있다. 구동용 전자석에서 발생하는 자계가 10배 이상 강력한 부상용 자계보다 동적으로 뒤틀어지는 점으로 생각된다.

## 5. 로터리 액츄에이터

1990년경부터 초전도체를 이용한 회전기의 제작에 관한 연구가 시작되었다. 미국의 Weinstein 등은 YBCO 벌크로 제작한 초전도 자석을 회전자로 사용하여 33 W 출력의 동기발전기를 개발하였다[3]. 일본의 Imuka는 상도체 코일을 전기자로 사용하여 직류모터를 제작하였다[4]. 이 장치는 최대 940 W, 1.48 Nm의 회전력을 발생할 수 있다.

세라믹 초전도회전기는 제조부분뿐만 아니라 송전계통에도 응용이 가능하다. 종전의 동제송전선과 비교하여도 3 ~ 5배의 송전량이 기대되며 세라믹 모

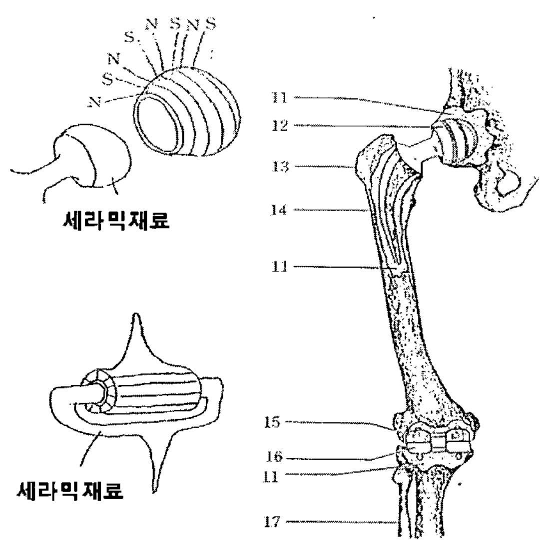



그림 3. 세라믹 인공관절 개념도.

터를 이용하여 공업용 회전구동력을 달성할 수 있다.

7.7 MW의 세라믹 초전도 직류동기모터는 같은 규격의 상전도 모터보다 크기와 에너지 손실면에서 50 % 정도의 이득을 가져온다. 따라서 액체질소 전류용 펌프로 세라믹 초전도 회전기를 사용하면 송전용 세라믹 선재 Cable을 냉각하는데 드는 비용도 줄일 수 있다.

고온 초전도 회전기는 제조 부문은 물론 전력 송전계통에도 응용이 기대된다. 현재 사용되고 있는 Cu계의 송전선에 비하여 3-5배 이상의 전력 송전량이 기대되는 Bi계 초전도 선재를 응용하는 Project가 미국, 일본을 중심으로 추진되고 있다. 일본의 Hurukawa社는 초전도 재료의 발열현상을 제어하기 위하여, 필요한 액체 질소의 환류량을 Simulation 하여, Bi 초전도 Cable 10 km 마다 냉각 Station을 설치하였고, 20 kg/cm$^2$에서 액체질소를 구동하는 시스템을 구현하였다. 이 시스템에서는 액체질소의 유량은 약 1.5 ℓ 이며, 3.1 kW 이상의 출력 Pump가 필요하게 된다. Edick 등의 연구에 따르면 7.7 MW의 산화물 초전도 직류 동기 모터는 같은 사양의 상전도 모터와 비교하여 크기 및 에너지 손실이 약 50 % 이상 감소하게 된다. 따라서 송전용 고온 초전도 선재 케이블을 냉각하기 위하여 액체 질소 환류용 Pump에 고온 초전도 회전기계를 적용하게 되면, 산업 Cost의 절감에 크게 기여하게 된다. 모터의 개념설계에 있어서, 볼 베어링 초전도 모터 보다 내구성이나 효율면에서 우수한 Pump형 Actuator를 제작은 가능하리라 생각된다. 특히 축류 Pump와 초전도 모터를 일체화하고, 베어링부분은 초전도 자기부상식으로 구현하는 구조가 유효할 것으로 사료된다[5-10]. 이 구조는 Pump 전체를 액체질소에 냉각이 가능하므로 회전 구동에도 초전도 모터를 사용하게 되면 Pump사이즈나, Actuator의 소비 전력을 감소시킬 수 있어 냉각부의 건설비용의 막대한 절감을 기대할 수 있다.

## 6. 인공관절에 응용

그림3은 비접촉 부상현상을 인체의 대퇴골과 무릎의 인공관절에 응용한 경우의 개념도이다. 관절의 일부를 초전도체로 구성하고, 영구자석을 그림 3과 같이 배치한다[11]. 이 경우는 건강한 사람의 생체관절에 있어서 10 ㎛ 이내인 윤활액 막두께의 자기부상 간격을 유지하여야 한다. 인공장기와 같은 생체응용이 가능하기 위해서는 상온에서 초전도 현상이 발생되는 재료의 출현이 시급하다. 현재는 가설로서 설명할 수 있으나, 초전도 재료는 공학적 실현의 가능성을 항상 내포하고 있다.

## 7. 결 론

초전도 베어링에 필수적인 기술로는 비접촉 베어링 기술 이외에도 냉각기술, 전동발전기 기술, 전력변환기술, 휠 제작기술 등이 있다. 이 중 가장 핵심이 되는 분야는 고에너지 저장밀도를 가지는 휠 제작기술이라고 볼 수 있다. 휠이 큰 회전관성을 가지면서 고속 회전시의 응력을 견딜 수 있으려면 초전도 재료의 중량 대비 인장강도가 커야 한다. 일반적인 강철이 이론적으로 약 30 Wh/kg의 에너지저장

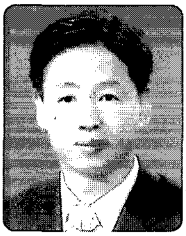
밀도를 가질 수 있음에 비해, Graphite T-1000 등 최근의 섬유 복합재들은 최대 수백 Wh/kg의 이론적인 에너지 저장밀도를 가질 수 있다고 알려져 있다. 근래에는 이종의 원통형 섬유 복합재를 압축 응력하에서 조립하여 휠의 에너지 저장밀도를 높이는 연구가 진행되고 있고 이러한 휠을 이용하여 제작한 베어링 장치도 보고되고 있다.

초전도 베어링 기술이야말로 복합재 휠 기술과 함께 이 두 요건을 만족시키기 위한 최적의 기술이라고 보여지며, 인류의 새로운 에너지 저장방식을 구현하는 열쇠가 될 것으로 믿는다.

## 참고 문헌

[1] T. Kitamura " The Challenge to Superconducting Mechatronics a Dream of Artificial Heart Technologists", J. Robotics and Mechatronics, 3-1, 1992.
[2] S. Nagaya, N. Hira, M. Minami, " The Study of the high Tc Superconducting Flywheel for the Energy Storage System", Proc. Int. Workshop on Superconductivity, p. 158, 1995.
[3] T. Iizuka, Y. Maeda, K. Akira " Conveyer by Superconducting Magnetic Levitation", Proc IEEE Symposium on Emerging Techniques & Faculty Automation, p. 62, 1994.
[4] T.Naka, T.Kitamura, " Drive and Control of High Tc Superconducting Linear Actuator, in Electromagbetic Systems, Studies in Electromagnetics in Materials", p. 225, IOS Press, 1998.
[5] T.Kitamura, " Compact High Tc Superconducting Linear Actuator System Design in Electromagbetic Systems, Studies in Electromagnetics in Materials", p. 1321, IOS Press, 1993.
[6] R.Weinstein, R.Sawh, A.Crapo, "An Experimental Generator Using High Temperature Superconducting Quasipermanent Magnets", IEEE Trans. on Applied Supercond, 5-2, p. 441, 1995.
[7] Y. Itoh, Y.Yanagi, M.Yoshikawa, M.Hoga, "High-temperature Superconducting Motor using YBaCuO Bulk Magnets", Jpn. J. Appl. Phys., 34, p. 5574, 1995.
[8] J.D.Edick, R.F.Schiferl, " High Temperature Superconductivity Applied to Electric Motors", IEEE Appl. Supercond, 2-4, p. 189, 1992.
[9] T.Naka, T.Kitamura, "Compact High Tc Superconducting Rotary Actuator System Design in Electromagbetic Systems, Studies in Electromagnetics in Materials ", Proc. 3rd Int. Conf.Adv. Mecht. Okayama, p. 330, 1998.
[10] Y.Yoshida, M.Uesaka, K.Miya, " Evaluation of Dynamic Magnetic Force of High Tc Superconductor with Flux Flow and Creep", Int. J. Electromagnetic in materials 5, p. 83, 1994.
[11] M.Komori, T.Kitamura, " Static Levitation in a High Tc Superconductor Tile on Magnet Arrangements, Jpn. Appl. Phys., 69, p. 7306, 1991.

**저|자|약|력**



성 명 : 최용성

◈ 학 력
· 1991년 동아대 전기공학과 공학사
· 1993년 동아대 동 대학원 전기공학과 공학석사
· 1998년 동아대 동 대학원 전기공학과 공학박사

◈ 경 력
· 1999년 - 2000년 JAIST Post-Doc.
· 2001년 - 2003년 오사카대학 Post-Doc.
· 2002년 - 2005년 원광대학교 연구교수
· 2006년 - 현 재 동신대 공과대학 전기공학과 교수

성 명 : 이상헌

◈ 학 력
· 1989년 일본 TOKAI Univ. 전기공학과 공학사
· 1991년 일본 TOKAI Univ. 전기공학과 공학석사
· 1994년 일본 TOKAI Univ. 전기공학과 공학박사

◈ 경 력
· 1994년 - 1997년 일본 초전도 공학연구소 책임연구원
· 1994년 - 1997년 일본 東京電氣대 연구교수
· 1997년 - 현 재 선문대 전자공학부 교수