

신개발 초전도 베어링의 특징과 이용

원 동 연

△ 초전도체를 이용한 무접촉 베어링
(분당 7만 5천 회전 가능)

한국원자력연구소 초전도체 연구실장

1. 개 론

초전도체란 이를 일정온도보다 낮은 온도상태로 냉각시키면 전기저항이 0이 되는 물질을 말한다. 초전도체는 이 상태에서 매우 큰 전력을 흘려서 엄청나게 강한 자석을 만들거나 전력손실이 없는 송전선을 만들 수도 있다. 또한 매우 특이한 전기, 자기적 특성을 갖고 있기 때문에 에너지, 교통, 의학, 자원탐사, 기초과학 등에 활용할 수 있다. 따라서 이 재료가 실용화되면 제 2의 산업혁명이 일어날 것으로 기대되기도 한다.

인류생활에 엄청난 영향을 줄 것으로 기대된 초전도체를 실용화하는 데 가장 큰 제한점은 이들 물질을 극히 낮은 온도로 냉각시켜야 한다는 점이다. 종래 개발된 임계온도 30K 이하의 초전도체(저온초전도체라고 불리움)가 초전도 특성을 나타내기 위하여 매우 값비싼 액체 헬륨이 사용되어야 하므로 그 이용이 크게 제한되어 왔다. 그런데 1987년 90K 이상의 높은 임계온도를 갖는 세라믹스 재료인 YBaCuO계 초전도체가 개발됨으로써(고온초전도체라고 불리움) 실용화에

신기원을 이루게 되었다. 고온초전도체는 액체 헬륨 대신에 값싼 액체질소를 사용할 수 있으므로 경제적으로 초전도체의 실용화를 가능하게 하였다.

2. 초전도체의 용도

초전도체의 용도로서는 크게 소형응용과 대형응용분야로 나누어 생각할 수 있는데, 대형응용이라 함은 끝자 그대로 단일 부품의 크기가 매우 큰 초전도체를 응용하는 경우를 말한다. 대형응용은 주로 에너지 문제와 깊이 관련되어 있는데, 강력한 자장을 이용한 고효율발전기, 손실이 거의 없는 송배전선 그리고 에너지 저장장치 등에 사용된다. 전기저장장치는 통조림처럼 초전도 코일에 전기를 저장해 놓고 필요할때 꺼내 쓰는 장치이다.

이것이 실용화되면 원자력이나 화력발전소를 최대 효율로 가동시킬 수 있게 되고 밤중에 남은 전기를 모아 두었다가 전기의 수요량이 많은 시간에 꺼내 쓸 수도 있다. 이상을 살펴볼 때 앞으로 에너지 문제 해결의 열쇠를 초전도체가

취고 있는 것 같다. 그 외에도 자석의 서로 미는 힘을 이용하여 기차를 공중에 뜨게 하여 움직일 수 있는 자기부상열차의 개발도 가능하다. 일본의 경우 현재 약 500km 이상의 시험주행을 실시한 바 있는데, 열차는 고속주행 뿐 아니라 소음과 진동이 없고 공기오염도 일으키지 않는다. 이 원리를 이용하면 우주선의 절반이나 차지하는 추진연료 없이도 우주선을 발사할 수 있는 길도 열린다. 바다를 다니는 선박도 초전도체를 이용하여 움직이게 할 수 있다. 또한 초전도 저장장치를 활용한 자동차의 개발도 수행중에 있는데, 이런 노력이 성공된다면 교통수단은 혁명적으로 바뀔 것이다.

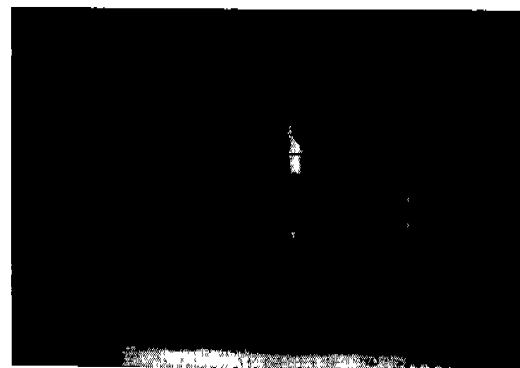
초전도체의 소형응용으로는 주로 전자공학 분야를 들 수 있다. 두개의 초전도체 사이에 매우 얇은 절연체를 끼운 샌드위치형의 조셉슨 접합(Josephson Junction)을 이용하면 작동속도가 빠르고 전력소비도 적은 컴퓨터 소자를 만들 수 있다. 이런 소자를 사용하면 기존의 컴퓨터에 비해 계산속도가 수십배 이상 빠른 획기적인 컴퓨터를 만들 수 있다.

조셉슨 소자를 이용하면 미세한 자장을 정확하게 감지할 수 있는 초전도양자간섭계(SQUID)를 만들 수 있다. 이 간섭계를 활용하면 재료의 물성측정에도 사용할 수 있으며, 또한 사람의 신경이나 근육의 활동 때 생기는 전류의 변화에 의한 자장의 변화까지 감지할 수 있어 생체반응 메카니즘, 또는 암세포 등의 탐지에도 이용된다. 더구나 신체의 정밀진단에 활용되고 있는 핵자기공명 단층촬영장치의 해상도를 높이는 데도 초전도체가 매우 유용하게 사용되므로 초전도체는 의료부문에 큰 영향을 미치고 있다.

3. 연구개발 동향

고온초전도체가 개발됨에 따라 초전도체의 실용화에 대한 각국의 경쟁이 전쟁을 방불케 되었다. 우리나라를 비롯한 서유럽, 동구유럽, 중공 등 많은 나라가 이 초전도체의 개발경쟁에 참여

하였으나, 수십년간 축적된 연구경험 및 높은 기술수준으로 인해 초전도체 개발에 있어서도 미국과 일본이 가장 선두에 나서고 있다. 고온초전도체의 실용화를 위해서는 초전도 박막 및 초전도 선재의 제조기술이 개발되어야 한다. 따라서 스퍼터링법, 화학증착법, 전자 빔이나 분자 빔을 이용한 박막제조기술과 압출, 인발, 압연, 스웨이징, 가압성형법 등에 의한 선재제조 기술에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 현재 세계적으로 박막으로는 임계전류밀도 10^4A/cm^2 급, 선재로는 임계전류밀도 10^4A/cm^2 급의 재료가 개발되어 실용화에 성큼 다가서고 있다.



(a) 사진에서와 같이 자기속박(Flux pinning) 효과에 의해서 초전도체가 공중에 매달리는 Suspension 효과가 나타남



(b) 초전도체 위에 자체무게(자중)보다 15배 이상 무거운 자석이 부상되어 있음

〈그림 1〉 준용해공정(QMP)을 이용하여 제조한 고자력 초전도체

그러나 박막의 경우 실제로 사용하기 위해서는 조셉슨 소자를 만들기 위한 초전도체 가공기술, 박막을 낮은 반응온도에서 합성할 수 있는 제조기술 등이 확립되어야 한다. 또한 현재 개발된 고온초전도체는 세라믹스로서 쉽게 부취지므로 선재의 가공이 매우 어렵다. 따라서 다른 재료와 복합하여 선재를 만드는 방법 등과 같이 물성이 균일하고 임계전류 밀도가 더 높은 선재를 제조할 수 있는 새로운 제조기술 개발이 요구된다. 임계온도의 경우 현재 125K 급의 탈륨(Tl)계 초전도체가 개발되어 있는데; 이보다 임계온도가 높은 재료의 개발에 관한 연구도 진행되고 있다.

국내의 연구동향을 살펴 보면 1987년부터 고온초전도체에 관한 연구가 시작된 이래 대학, 연구소, 산업체의 전문가들로 구성된 초전도 연구협의회가 발족되었으며, 이 협의회를 중심으로 국가의 특정연구과제로서 본격적인 초전도체 연구가 수행되었다. 현재는 지난 3년간의 1단계 연구를 끝내고, 1990년 10월부터 2단계 연구가 국책과제로서 산업기반기술의 확립이란 목표를 갖고 시작되었다.

그동안 수행된 연구내용을 한국원자력연구소의 연구결과를 중심으로 소개해 본다. 당 연구소에서는 1987년 중반 90K 급의 Y계 초전도체 개발한 이래 1988년에는 105K 급 Bi계 초전도체 합성에 성공하였다. 다음해인 1989년 6월에는 선재로 사용될 수 있는 Bi계 초전도 테이프를 개발하였으며, 1990년 초에 들어서는 임계전류밀도 10^5 A/cm^2 급의 Y계 초전도체 박막을 제조하여 실용화에 기여하였다. 특히 이 박막은 화학증착법을 이용하여 제조하였는데, 이 제조법을 사용하면 대량생산이 가능하며 초전도 선재의 제조에도 응용될 수 있는 매우 유용한 공정으로 향후 그 응용이 기대된다. 그 해 6월에는 준용해법을 이용하여 임계전류밀도가 높으며 고자계(High Magnetization)를 갖는 Y계 초전도체를 개발하였다. 이 초전도체는 고자계 및 Pinning 효과 때문에 종래의 초전도체와는 달리 매달림

(Suspension) 특성을 갖는다. 또한 1991년에는 이 초전도체를 이용하여 공중에 부상하여 회전하므로 손실이 없는 기계부품용 베어링의 개발을 성공시킨 바 있다.

4. 초전도 베어링 개발

한국원자력연구소에서는 준용해법(Quasi-Melt-Process)에 의해 제조된이트륨(Y)계 고온초전도체를 이용하여 분당 약 75,000회전(75,000 rpm)이 가능한 초전도 베어링을 개발하였다(표제사진). 본 베어링은 초전도체가 갖는 부상효과(물체를 띄우는 성질) 및 속박효과(물체를 잡아매두는 성질)를 이용, 회전축이 아무런 지지점이 없이 초전도체 위에 떠서 회전하기 때문에 마찰저항이 없어 고속회전이 가능하다.

일반적으로 기계적인 베어링은 수천 rpm이 한도이며, 그 이상의 회전은 유체압 또는 자력 등 특수한 방법을 써야 가능하다. 그러나 이번 초전도체를 이용하여 고속 베어링을 개발함으로써 기존의 방법보다 훨씬 쉽고 간단하게 고속회전을 얻을 수 있어 앞으로 소형 모터 및 펌프, 디스크드라이브, 원심분리장치, 광학주사 시스템, 자이로스코프 등에 응용할 수 있다. 또한 냉각장치 등의 보완이 이루어지면 모터 기기의 무손실화, 신뢰도 제고 등으로 기계 산업에 크게 기여할 것으로 보인다.

이번 초전도 베어링 개발은 기존의 초전도체가 갖는 부상효과 외에 속박효과를 갖는 새로운 초전도체를 개발함으로써 가능해졌다. 즉이트륨, 바륨, 구리를 적정 비율로 혼합해 구워 초전도체를 만든 다음 이것을 다시 섭씨 1050도정도까지 가열, 준용해 상태로 만든 다음 서서히 식히는 준용해공법(QMP)을 추가함으로써 초전도 입자 사이에 비초전도 입자가 분산 배열되는 특수한 재료를 만들어 낸 것이다. 이러한 재료는 기존 초전도체가 물체를 띄우는 성질을 갖는데 비해 상하좌우 어느 쪽이나 일정한 간격으로 붙잡아 매두는 성질을 갖게 되므로 회전축을 안

정적으로 고정시킬 수 있게 된 것이다.

본 초전도 베어링은 자력속박(Flux pinning) 효과를 갖는 초전도체를 임계온도로 냉각시키고 그 위에 회전축을 부상시켜 마찰요인을 제거하였다. 그 회전축에 자력선 밀도가 0.35 테슬라(T) 정도인 Sm계 영구자석을 부착하고, 축을 회전시키기 위해 축중앙에도 영구자석을 삽입하였다. 축을 회전시키기 위해 에어 코어 코일(Air core coil)을 이용하여 전류방향을 조절함으로써 코일의 극을 바꾸어 축을 회전시켰다.

본 고온 초전도체 베어링은 일반적인 베어링 처럼 중력방향에 수직하게 위치시킬 필요없이 어느 정도 각도로 기울여도 회전시킬 수 있으며 축의 공중높이 및 좌우 위치를 어느 정도 범위 내에서 자유로이 조절하여도 안정한 상태로 회전시킬 수 있다. 이 인력은 축 방향 및 축에 수직한 방향 모두에 작용되므로 한개의 베어링 설치로 레이디얼(Radial) 및 트러스트(Thrust) 베어링의 기능을 동시에 나타낼 수 있는 장점을 가지고 있다. 또한 초전도 베어링은 윤활재를 사용하지 않으므로 윤활재를 사용하는 일반 베어링과는 달리 진공 중에서도 활용 가능하다.

본 초전도체가 실제 산업에 응용될 경우 기계 공업에 상당한 효과를 가져올 것으로 예상된다. 에너지의 손실을 최소화할 뿐더러 초고속 회전을 아주 손쉽게 얻을 수 있기 때문이다. 현재 7만 5천 회전 속도의 한계는 초전도 베어링 자체의 한계가 아니며 회전구동장치나 공기 마찰 등에 의한 것이므로 구동장치의 개선, 진공장치 개발을 통해 회전속도를 10만~20만 rpm까지 높이는 것이 가능하다. 그리고 초전도체의 특성 향상, 최적 냉각 시스템 개발 등을 통해 산업계에 사용될 무손실 모터의 개발로 에너지 산업에 크게 기여할 것으로 보이며 본 초전도 베어링의 이와 같은 초고속 회전에 따른 새로운 용도의 창출도 기대되는 바다. 또한 본 초전도 베어링의 개발은 재료의 특성향상 및 기초 응용 연구 단계에 있는 기존 국내의 연구단계를 뛰어 넘어 산업계의 영향을 줄 수 있는 실용화의 단계에 진입

하였다는 데 의의를 둘 수 있다.

5. 향후 전망

고온초전도체의 출현으로 초전도 연구는 기초부터 응용분야까지의 그 모습이 급격히 변모하게 되었다. 현재까지는 알려지지 않고 있지만 실은 부근 또는 그 이상의 임계 온도를 지닌 안정된 초전도체가 나오게 되면 그 영향은 헤아릴 수 없을 것이다. 그러나 현 시점에서는 모든 면에서 초기단계이므로 기초적인 이론 연구로부터 재료의 물성연구, 실용화를 위한 박막 및 선재제조 기술연구, 디바이스 제조, 실용가능화 제품개발 연구 등이 병행적으로 수행되어야 할 것이다.

고온초전도체의 실용화의 시기에 대해서는 3년부터 10년 이상까지 그 의견이 다양하지만 초전도체가 산업전반에 미치는 막대한 영향을 고려해 볼 때 꾸준하며 집중적인 연구가 절실히 요구된다. 일본이나 미국 등 선진국의 초전도 연구의 동향을 살펴볼 때 고온초전도체를 이용하여 전자소자나 트랜지스터 응용기초기술 개발, 자기 실드용 산화물 초전도체 개발, 초전도발전기 회전자 시제품 제작, 고온초전도 코일 개발과 같은 연구 등에서 큰 성과를 얻고 있음을 고려한다면 현 시점은 이미 고온초전도체 실용화의 문턱에 들어섰다고 생각된다. 따라서 선진국들은 이에 따른 산업계에 미칠 지대한 영향을 감지하여 기업체들이 초전도연구에 적극적으로 참여하여 산업계에 직접 응용될 기술들을 집중적으로 개발하고 있는 실정이나, 국내에서는 산업화가 가능한 초전도 관련 연구개발이 매우 미비한 편이며 초전도 연구개발에 대한 기업체의 관심도 부족한 현실이다. 그러나 한국의 경우 21세기에 선진국의 일원으로서의 진입을 목표로 볼 때 초전도체 연구의 중요성은 더욱 강조된다. 이제까지 과학자들이 발전시켜 온 연구속도로 보아 초전도 현상을 응용할 수 있게 될 날은 그렇게 멀지 않을 것이며, 인류의 생활과 문명의 발전에 크게 기여할 것이다.