

고온 초전도 선재 응용 연구의 동향

■ 김 석 환 / 한국전기연구원 선임연구원

초전도를 응용하는 방법은 거시적 현상을 이용하는 방법과 미시적 현상을 이용하는 방법으로 나눌 수 있다. 거시적 현상을 이용하는 방법이란 초전도체의 무저항, 비자성의 성질을 이용하는 것을 말하고, 미시적 현상을 이용하는 방법이란 초전도체 내에서 발생하는 tunneling 효과 (Josephson 효과)를 이용하는 방법을 말한다.

미시적 현상을 이용하는 경우 초전도체는 보통 박막의 형태로 사용된다. 초전도체 덩어리 (bulk)를 사용하는 일부의 응용을 제외하면 거시적 현상을 이용하는 경우 초전도체는 선재의 형태로 만들어져야 한다. 이 글은 고온 초전도 선재의 개발 및 선재를 기기에 응용하기 위한 연구의 동향을 소개하기 위한 글이다.

고온 초전도체

고온 초전도체가 발견되기 전에 사용하던 금속계 초전도체인 NbTi 등은 비싼 액체 헬륨으로 냉각해야 하기 때문에 특수한 용도에만 응용되었다. 1986년 액체 질소 온도에서 초전도가 되는 고온 초전도체가 발견되면서 사람들은 값싼 액체 질소로 냉각하는 손실 없는 초전도 장치가 등장할 것을 예상했고 곧 초전도 혁명이 일어날 것이라는 생각을 했다.

초전도체가 초전도 상태가 되기 위해서는 온도, 자장, 전류밀도가 어느 이하가 되어야 한다. 이 세 값은

상수로 주어지는 것이 아니라, 온도가 낮아지면 견딜 수 있는 자장이 커지고 자장이 강해지면 흘릴 수 있는 전류 밀도가 줄어드는 등 상호 관계를 가지고 있다. 이 세 값의 관계를 그래프로 나타낸 것을 임계곡면이라고 하는데, 아래 그림과 같다.

그림 1 은 대표적인 저온 초전도체인 NbTi, Nb₃Sn, NbGe와 고온 초전도체인 YBaCuO의 임계곡면을 나타내고 있다. 그림에서 볼 수 있는 것과 같이 고온 초전도체는 저온 초전도체보다 훨씬 더 높은 온도에서 초전도성을 나타낸다.

그림 1 그림만 보면 고온 초전도 선을 사용하면 값싼 액체 질소로 냉각하는 경제성 있는 초전도 기기를 만들 수 있을 것 같지만, 현실은 그렇게 간단치 않다. 고

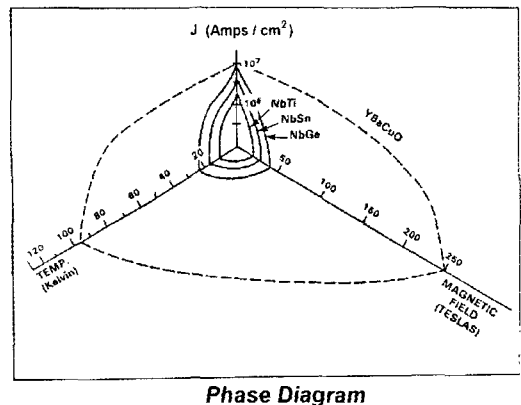


그림 1 초전도체의 임계곡면

온 초전도체가 저온 초전도체에 비해 높은 온도에서 초전도성을 나타내는 것은 사실이지만, 고온 초전도선은 저온 초전도선과 비교할 때 몇 가지 중요한 문제점을 가지고 있는데 다음과 같다.

1. 부서지기 쉬운 물질이다.
2. 질소 온도에서 자장 특성이 좋지 못하다. (1세대 고온 초전도의 경우)
3. 권선이 어렵다.
4. 교류 손실이 크다.

부서지기 쉽다

저온 초전도체는 금속이기 때문에 인발(drawing)의 방법으로 길게 뽑아낼 수 있다. 그러나 고온 초전도체는 세라믹 계열의 물질이기 때문에 부서지기 쉬운 성질을 가지고 있어서 금속과 같은 방법으로 제조하는 것은 불가능하다. 선재로 만들기 위해서는 다른 방법이 필요한데, 크게 나누어서 금속 튜브에 고온 초전도체 분말을 넣은 다음 인발하는 방법(PIT, Powder In Tube)과 금속 테이프 위에 고온 초전도체 막을 입히는 방법(CC, Coated Conductor)이 있다.

처음으로 성공한 고온 초전도 선재는 BiSrCaCuO를 PIT 방법으로 제조한 것이다. 은으로 된 튜브에 BiSrCaCuO 분말을 채운 다음 인발(drawing)에 의해 길게 뽑고, 롤러로 납작하게 만든 다음 열처리를 한다는 것이 이 방법의 원리이다. 납작하게 만드는 것은 물질의 분자 구조상 평면에 가깝게 만드는 것이 더 좋은 성능의 초전도선이 되기 때문이다. 처음 성공한 고온 초전도 선재이므로 제 1 세대 초전도선이라고 부르고, BiSrCaCuO는 보통 줄여서 BSCCO라고 부르고 있다.

질소 온도에서의 자장 특성이 좋지 못하다

이렇게 해서 만들어진 BSCCO 선재는 기대한 만큼의 성능을 내 주지 못했다. 액체 질소 온도인 77K 에서 동작시킬 경우 견딜 수 있는 자장이 기대보다 낮았던 것이다. 그림 1에서도 알 수 있는 것과 같이 더 강한 자장에서 초전도 상태가 되도록 하려면 동작 온도를 낮추면 된다. 그래서 BSCCO 선재를 사용하는 초전도 장치는 더 낮은 온도로 냉각해야 된다. 값싼 냉매로 냉각

하기 때문에 경제성이 있다고 했던 기대가 반감된 것이다.

더 낮은 온도로 냉각하기 위해서 냉매로 액체 헬륨을 사용하게 되면 고온 초전도체를 사용하는 의미 자체가 없어져버리므로 액체 헬륨을 사용하지 않고 질소 온도 이하의 온도로 냉각할 수 있는 방법이 필요하게 되는데, 현재 시도되는 방법은 cryo-cooler를 사용하여 20 K - 30 K 정도의 온도로 냉각하는 방법이다.

그리고 한 편으로는 액체 질소에서 사용할 수 있는 고온 초전도 선재의 개발이 진행되고 있다. 앞에서 설명한 것처럼 BSCCO는 액체 질소 온도에서의 자장 특성이 좋지 못하므로, 액체 질소에서의 자장 특성이 좋은 YBaCuO라는 물질로 선재를 만들려는 연구가 진행 중이다. YBaCuO는 줄여서 YBCO라고 부르는데, 2 세대 선재라고 부르기도 한다. 2 세대 선재는 첨단 CC 공정이 이용된다. 펄스 레이저로 YBCO를 플라즈마 상태로 만들고 금속 테이프를 그 플라즈마 속을 지나가게 해서 금속 테이프의 표면에 YBCO를 코팅한다는 것이 원리이다.

권선이 어렵다

고온 초전도 선으로 코일 등을 만들 경우 권선이 곤란하다는 문제가 있는데, 그것은 선재가 테이프 모양이기 때문에 발생하는 문제이다. 예를 들어 초전도 마그넷을 만들 경우 한 층을 감은 후 다음 층으로 넘어가는 과정에서 테이프가 손상된다는 것이다 (그림 2의 화살표 부분).

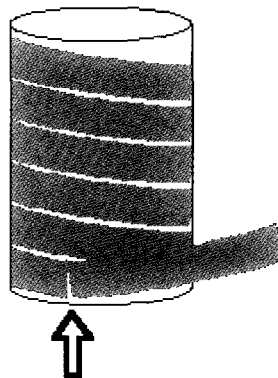


그림 2 고온 초전도 선으로 마그넷을 만들 때의 문제점

는 과정에서 테이프가 손상된다는 것이다 (그림 2의 화살표 부분).

이 문제 때문에 고온 초전도 테이프를 마그넷을 만들 경우, 구부리지 않고 감은 납작한 마그넷 (pancake winding)을 여러 개 겹쳐놓고 안쪽과 바깥쪽을 교대

로 납땜하는 방법을 사용한다. 안쪽은 보빈에 밀착되어 있어서 납땜하기가 어려우므로 안쪽은 테이프를 구부리도록 한 double pancake 이라는 방법을 사용하기도 한다. 구부리지 않겠다는 아이디어에 역행하는 방법이지만 한 바퀴 전체에 걸쳐 완만하게 구부리는 방법으로 보완하고 있다.

Pancake 이나 double pancake 방법을 사용하면 마그네틱의 중간에 납땜 등의 방법으로 접합해야 하는 부분이 생기는데, 이 접합 부분은 저항이 있으므로 전류를 흘리면 저항 발열이 발생한다. 초전도의 장점을 반감시켰다고 할 수 있다.

교류 손실이 크다

일반적으로 초전도는 무손실이라고 알려져 있다. 그래서 초전도선으로 송전을 하면 손실 없는 송전이 된다고들 한다. 그런데 이 말은 사실과 다르다. 초전도가 무손실인 것은 전류와 자장이 변하지 않을 때에 한정되는 이야기이다. 우리나라는 60 Hz 교류를 사용하므로 초전도선으로 송전을 하더라도 무손실이 되지 않는다. 이와 같이 전류나 자장이 변할 때에 초전도체에 발생하는 손실을 교류 손실 (AC loss)라고 하는데, 교류 손실에 대한 연구는 초전도 연구의 한 큰 분야를 차지하고 있다.

교류 손실이 있다는 것은 단순히 에너지의 낭비가 있다는 것만을 의미하지는 않는다. 교류 손실이 있으

면 냉각 장치의 크기도 그만큼 더 커져야 되고, 교류 손실에 의해 발생한 열 때문에 초전도체의 온도가 상승하여 초전도 상태를 유지하지 못하는 경우가 생길 수도 있다.

교류 손실은 물질 자체가 가지고 있는 특성이므로 획기적인 새로운 물질이 발견되지 않는 한 근본적으로 없앨 수 없다. 그렇다고 교류 손실을 줄일 수 있는 방법이 전혀 없는 것은 아니다. 선재를 만들 때 초전도선의 굵기를 가늘게 할수록 교류 손실이 줄어든다는 것은 이미 잘 알려져 있다. 즉 굵은 한 가닥의 초전도선 보다는 가는 여러 가닥의 초전도선이 교류 손실이 적다는 것이다.

저온 초전도체인 NbTi의 경우, 프랑스의 Alstom이라는 회사에서 1 μ m 이하의 직경을 갖는 아주 가는 초전도선(filament) 수만 가닥을 모아서 만든 "교류용 초전도선"을 개발했다. 그러나 이런 노력에도 불구하고 교류용 초전도선은 교류에 사용되지 못했다.

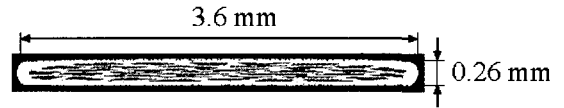
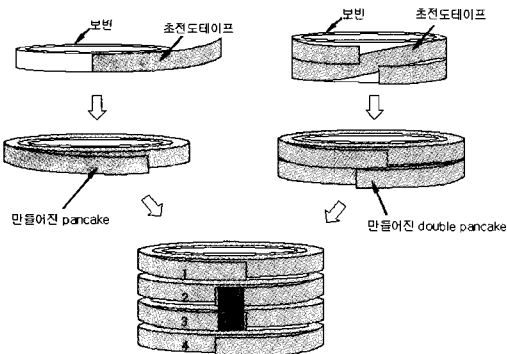


그림 4 한국전기연구원에서 개발한 BSCCO 선재의 단면 사진



4 개의 pancake 또는 2 개의 double pancake으로 만든 코일 (pancake의 경우 1-2, 3-4는 내부에서 접합)

그림 3 Pancake winding과 double pancake winding 방법

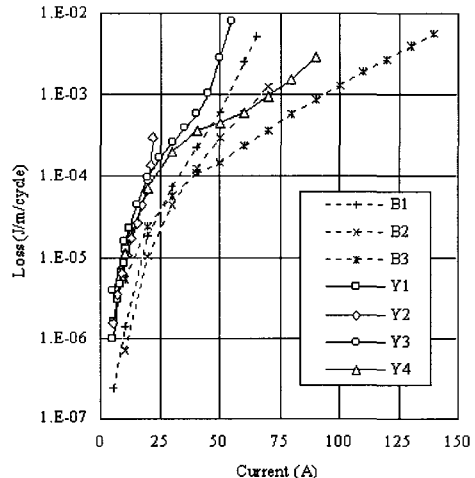


그림 5 BSCCO와 YBCO의 교류 통전시의 손실. B1 - B3는 BSCCO 선재를 의미하고, Y1 - Y4는 YBCO 선재를 의미한다.

고온 초전도체의 경우는 사정이 더 좋지 못하다. 물질의 특성상 아주 가는 filament를 만들 수 없는 것이 문제인데, 현재 기술로는 0.1 mm 이하의 굵기로 만드는 것도 어렵다. 이렇다 보니 고온 초전도체는 교류 손실이 클 수밖에 없다.

YBCO는 자장 특성이 BSCCO에 비해 우수하기 때문에 교류 손실도 더 적을 것이라고 기대했다. 그러나 YBCO 선재는 이런 막대한 기대에 부응해 주지 않았다. 측정 결과는 BSCCO 선재보다 YBCO 선재가 오히려 교류 손실이 더 크다는 것을 나타내고 있었다. 그림 5는 최근에 측정된 교류 손실의 결과를 보여주고 있다.

그 이유 중 한 가지는 filament 구조가 아니라는 것이다. BSCCO는 NbTi 만큼 가늘지는 않지만 어쨌든 filament 구조로 되어 있는데, 지금까지 제작된 YBCO 선재는 테이프 전체가 함께 코팅된 상태이기 때문에 교류 손실이 커졌다는 것이다. 또 한 가지 이유는 기관이라고 부르는 금속 테이프에 있다. YBCO로 초전도 테이프를 만들 때 테이프의 재질로 아무거나 선택할 수 있는 것이 아니다. 특정한 물질을 특수한 처리를 해주지 않으면 테이프 위에 YBCO가 코팅 될 때 초전도가 되는 상태로 분자들이 배열해 주지 않는다.

따라서 기관으로 사용할 수 있는 재질은 한정되어 있는데, 그 중 가장 많이 사용되는 재질인 Ni-W는 제조 공정을 지나고 나면 약간의 자성을 띠게 된다. 이 자성 때문에 YBCO 테이프의 교류 손실이 늘어나게 되는 것이다.

사실 교류 손실 그 자체는 그 크기가 얼마 되지 않는다. 그런데 문제는 이 손실이 극저온에서 발생한다는 것이다. 액체 질소 온도에서 1W의 열이 발생했다고 할 경우 이 열을 냉각시키기 위해서 냉각기는 수십 W의 에너지를 소모해야 한다. 액체 헬륨의 경우에는 수백 W가 필요하다.

문제점의 해결 노력

앞에서 고온 초전도 선재의 응용을 위해 해결해야 하는 문제점을 알아보았다. 간단히 요약하자면 고온 초전도체가 응용되기 위해서는 액체 질소 또는 더 저렴한 방법으로 냉각할 수 있어야 하고, 선을 감을 때 손상되지

않아야 하며, 교류 손실이 적어야 한다는 것이다.

액체 질소 냉각은 제 2 세대 초전도 선재가 개발되면 해결될 것으로 예상된다. 선을 감는 방법도 어떻게든 해결할 수 있겠지만, 문제는 교류 손실이다. 교류 손실을 연구하는 많은 사람들이 지금도 그 방법을 열심히 탐색하고 있다. 현재 시도되는 방법은 앞에서 설명한 filament 구조로 만드는 방법으로, 예를 들면 YBCO 테이프 선재를 만든 다음 길이 방향으로 홈을 내는 방법과 같은 것이다.

그러나 아직 교류 손실을 줄이는 방법은 찾지 못했고 많은 사람들이 비판적인 견해를 가지고 있어서, 직류에 응용하는 방법이나 미시적 현상을 이용하는 소자 연구에 더 중심을 두어야 한다는 주장이 조금씩 힘을 얻고 있다.

교류 손실을 획기적으로 줄일 수 있는 방법이 개발되어 초전도 전력기가 상용화되지 아니면 직류에서 사용되는 더 많은 초전도 장치가 개발될지, 또는 초전도 수퍼 컴퓨터가 나오게 될지 하는 것은 초전도를 연구하는 사람들이 어떻게 하느냐에 달려 있다고 하겠다.

참고문헌

- [1] 김석환, 한송엽, “초전도 공학 개론,” 대영사, 2004.
- [2] Seog-Whan Kim, Jin-Hong Joo, Kyu Jeong Song, Chan Park, Rock-Kil Ko, Hong-Soo Ha, Ho-Sup Kim, Seung-Hyun Moon, Sang-Im Yoo and Kyungwoo Ryu, “AC Transport Current Losses of BSCCO and YBCO Tape,” Applied Superconductivity Conference, Jacksonville, USA, October 3-8, 2004.
- [3] Yukikazu Iwasa, “HTS magnets: stability; protection; cryogenics; economics; current stability/protection activities at FBML,” Cryogenics, vol. 43, 2003, pp303-316.
- [4] “Superconductivity for Electric Systems 2004 Annual Peer Review,” DOE Peer Review, July 27-29, 2004.