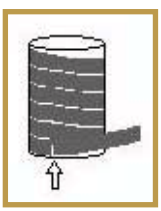
교류손실 최소화해 초전도 혁명 이룬다

글 | 김석환 _ 한국전기연구원 선임연구원 swkim@keri.re.kr

1986년 고온 초전도체가 발견되면서 온 세계가 초전도 열풍에 휩싸였다. 값비싼 액체 헬륨으로 냉각해야 하는 저온 초전도체와는 달리 고온 초전도체는 값싼 액체 질소로 냉각해도 된다는 점 때문에 곧 초전도 혁명이 일어날 듯했다. 그리고 20년 후에는 초전도가 일상생활에까지 사용될 것이라고 했다. 그러나 20년이 지난 지금까지 혁명은 일어나지 않았고 일어날 기미도 보이지 않는다. 무엇이 문제인가.

1986년 이전에는 액체 헬륨으로 냉각하여 절대온도 4.2K (영하 269도)에서 동작하는 NbTi라는 금속 초전도체로 선을 만들었는데, 액체 헬륨의 가격이 너무 비싸고 냉각 장치를 만드는 것이 어려워서 특수한 용도에만 사용되었다. 그러다 1986년 액체 질소 온도인 절대온도 77K (영하 196도)에서 초전도성을 나타내는 고온 초전도체가 발견되고 초전도의 사용이 폭발적으로 증가할 것이라고 생각했던 것이다.



그런데 고온 초전도체는 선재로 만들기가 쉽지 않았다. 저온 초전도체는 금속이기 때문에 구리선을 만드는 것과 같이 '길게 뽑아내면' 된다. 그런데 고온 초전도체는 세라믹 계열의 물질이기 때문에 부서지기 쉬운 성질을 가지고 있어서 길게 뽑아내어 선재로 만들 수 없어 "비스킷으로 국수를 뽑아야 한다"는 농담을 하기도 했다.

처음으로 선재화에 성공한 고온 초전도체는 BSCCO(분자 조성은 BiSrCaCuO인데 줄여서 'BSCCO' 라고 쓰고 '비스코' 라고 읽는다)인데, 처음 성공한 고온 초전도 선재이므로 제1세대 초전도선이라고 부른다. 은으로 된 튜브에 BSCCO 분말을 채운 다음 길게 뽑고, 롤러로 납작하게 만든 다음 열처리를 하는 것이 이 방법의 원리이다. 납작하게 만드는 것은 물질의 분자 구조상 평면에 가깝게 만드는 것이 더 좋은 성능의 초전도선이 되기 때문이다.

제1세대 BSCCO 선재 경제성, 기대에 못미쳐

이렇게 해서 만들어진 BSCCO 선재는 기대한 만큼의 성능을 내지 못했다. 액체 질소 온도인 77K 에서 동작시킬 경우 견딜 수 있는 자기장이 기대보다 낮았던 것이다. 초전도체는 온도를 내릴수록 더 강한 자기장을 견디기 때문에 BSCCO 선재를 사용하는 초전도 장치는 더 낮은 온도로 냉각하는 것이 보통이다. 값싼 냉매로 냉각하기 때문에 경제성이 있

을 것이라던 기대가 반감된 것이다.

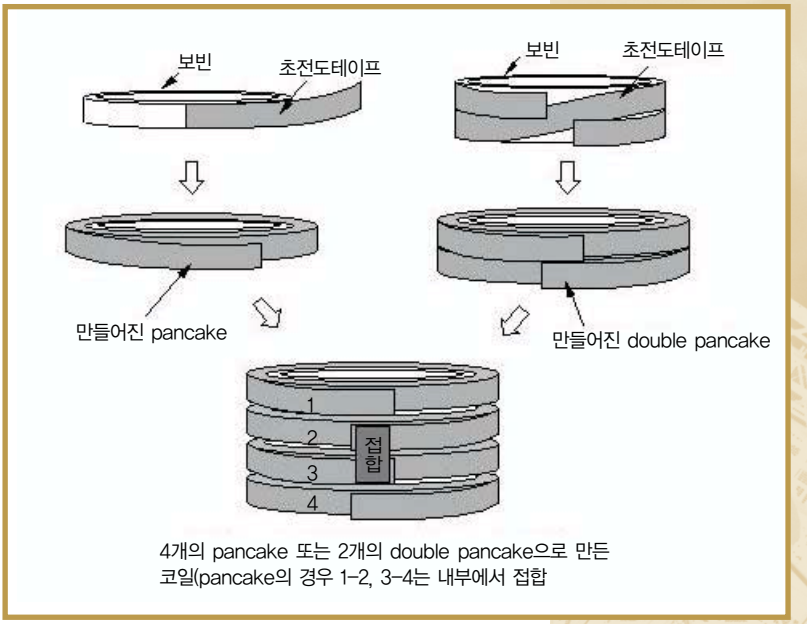
고온 초전도 선으로 코일 등을 만들 경우 또 한 가지의 문제가 있는데, 그것은 선재가 납작한 테이프 모양이라서 구리선을 감듯이 감기가 어렵다는 것이다. 예를 들어 초전도 자석을 만들 경우 한 층을 감은 후 다음 층으로 넘어가는 과정에서 테이프가 손상된다(그림 1의 화살표 부분).

이 문제 때문에 고온 초전도 테이프로 자석을 만들 경우, 구부리지 않고 감은 납작한 자석을 여러 개 겹쳐놓고 안쪽과 바깥쪽을 교대로 납땜하는 방법을 사용한다. 안쪽은 납땜하기가 어려우므로 안쪽은 테이프를 구부러지도록 한 '더블 팬케이크' 라는 방법을 사용하기도 한다. 구부리지 않겠다는 아이디어에 역행하는 방법이지만 한 바퀴 전체에 걸쳐 완만하게 구부리는 방법으로 보완하고 있다.

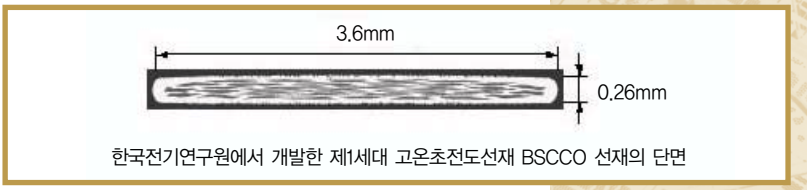
그러나 중간에 납땜 등으로 이어야 한다는 것은 큰 문제이다. 초전도선은 중간에 이어 쓰게 되면 잇는 부분에서 저항이 생긴다. 될 수 있으면 잇는 부분이 없이 전체를 만들어야 되는데, 팬케이크나 더블 팬케이크는 잇는 부분 없이는 코일을 만들 수 없는 방법이다. 초전도의 장점을 반감시켰다고 할 수 있다.

지금까지 고온 초전도체가 가지는 몇 가지 문제점에 대해서 설명했지만 이보다 더 큰 문제는 '교류 손실' 이다. 일반적으로 초전도는 무손실이라고 알려져 있다. 그래서 초전도선으로 송전을 하면 손실 없는 송전이 된다고들 한다. 그런데 이 말은 사실과 다르다. 초전도가 무손실인 것은 전류와 자기장이 변하지 않을 때에 한정되는 이야기이다. 우리 나라는 60Hz 교류를 사용하므로 초전도선으로 송전을 하더라도 손실이 일어난다. 이와 같이 전류나 자기장이 변할 때 초전도체에 발생하는 손실을 교류 손실(AC loss)이라고 하는데, 교류 손실에 대한 연구는 초전도 연구의 중요한 분야다.

교류 손실이 있다는 것은 단순히 에너지의 낭비가 있다는 것만을 의미하지는 않는다. 교류 손실이 있으면 냉각 장치의 크기도 그만큼 더 커져야 되고, 교류 손실에 의해 발생한 열 때문에 초전도체의 온도가 상승하여 초전도 상태를 유지하지 못하게 되는 경우가 생길 수도 있다.



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



한국전기연구원에서 개발한 제1세대 고온초전도선재 BSCCO 선재의 단면

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 초전도 선의 굵기를 가늘게 할수록 교류 손실이 줄어든다는 것은 이미 잘 알려져 있다. 즉 굵은 한 가닥의 초전도선보다는 가는 여러 가닥의 초전도선이 교류 손실이 적다는 것이다.

저온 초전도체인 NbTi의 경우, 프랑스의 알스톰이라는 회사에서 1㎛ 이하의 직경을 갖는 아주 가는 초전도선인 '필라멘트' 수만 가닥을 모아서 만든 교류용 초전도선을 개발했다. 그러나 이런 노력에도 불구하고 교류용 초전도선은 교류에 사용되지 못했다.

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

제2세대 YBCO 선재도 교류손실 해결 못해

앞에서 설명한 것처럼 제1세대 고온 초전도체는 액체 질소에서 사용하기에 무리가 있고 교류 손실을 줄이기 힘들다. 그래서 지금 제2세대 선재인 YBCO (분자 조성은 YBaCuO인데 줄여서 YBCO라고 부른다) 선재의 개발이 한창이다. 제2세대 선재는 1세대 선재와는 달리 제조에 첨단 공정이 이용된다. 펄스 레이저로 YBCO를 플라스마 상태로 만들고 금속 테이프를 그 플라스마 속을 지나가게 해서 금속 테이프의 표면에 YBCO를 코팅한다는 것이 원리이다.

YBCO는 자기장 특성이 BSCCO에 비해 우수하기 때문에 개발만 된다면 액체 질소에서 사용할 수 있을 것으로 보인다. 그리고 우수한 자기장 특성으로 인해 교류 손실도 더 적을 것이라고 기대했다. 그러나 YBCO 선재는 이런 막연한 기대에 부응해 주지 않았다. 측정 결과에 따르면 BSCCO 선재보다 YBCO 선재가 오히려 교류 손실이 더 크게 나타났다.

그 이유 중 한 가지는 필라멘트 구조가 아니라는 것이다. BSCCO는 NbTi 만큼 가늘지는 않지만 어쨌든 필라멘트 구조로 되어 있는데, 지금까지 제작된 YBCO 선재는 테이프 전체가 함께 코팅된 상태이기 때문에 교류 손실이 커졌다는 것이다. 또 한 가지 이유는 기판이라고 부르는 금속 테이프에 있다. YBCO로 초전도 테이프를 만들 때 테이프의 재질로 아무것이나 선택할 수 있는 것이 아니다. 특정한 물질에 특수 처리를 해 주지 않으면 테이프 위에 YBCO가 코팅될 때 초전도가 되는 상태로 분자들이 배열되지 않는다.

따라서 기판으로 사용할 수 있는 재질은 한정되어 있는데, 그 중 가장 많이 사용되는 재질인 Ni-W는 제조 공정을 거치고 나면 약간의 자기성을 띠게 된다. 이 자기성 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 질소온도에서 1W의 열이 발생했다고 할 경우 이 열을 냉각시키기 위해서 냉각기는 수십 W의 에너지를 소모해야 한다.

그렇다면 초전도가 전력 기기에 사용되기 위해서 무엇이 필요한가. 앞의 설명을 요약하자면 필요한 것은 세 가지가 되는데, 액체 질소 또는 더 저렴한 방법으로 냉각할 수 있어야 하고, 선을 감을 때 손상되지 않아야 하며, 교류 손실이 적어야 한다는 것이다.

액체 질소 냉각은 제2세대 초전도 선재가 개발되면 해결될 것으로 예상된다. 선을 감는 방법도 어떻게든 해결할 수 있겠지만, 문제는 교류 손실이다. 많은 연구자들이 노력하고 있지만 아직까지 교류 손실을 줄일 수 있는 방법은 찾지 못했고, 많은 사람들이 비관적인 견해를 가지고 있다.

그렇다면 앞으로 초전도 혁명은 가망 없다는 것인가. 모든 것은 교류손실을 어떻게 획기적으로 줄일 수 있는가에 달려있다. 교류 전력 기기 이외의 분야로 눈을 돌리면 더 많은 가능성이 보인다. MRI, NMR, SQUID 등 현재 상용화가 되어 있는 초전도 기기는 모두 직류를 사용하는 기기이고, 자기부상열차도 직류를 사용한다. 직류를 사용하는 새로운 초전도 기기가 개발될 가능성도 있다. 그리고 대형 장치가 아닌 컴퓨터 소자, 정밀 센서 등에도 초전도를 응용할 수 있는 가능성은 얼마든지 있다. 그리고 현재 전력 공급을 직류로 하려는 움직임이 시작되어 점점 더 많은 사람이 참여하고 있는데, 직류화가 된다면 초전도를 이용한 무손실 송전이 가능해질 것이다. 초전도 혁명의 가능성은 지금도 열려있고 새로운 도전을 기다리고 있다. ST

글쓴이는 서울대학교 전기공학과 졸업 후 동대학원에서 석사, 박사학위를 받았다. 일본 고에너지물리학연구소 연구원, 유럽 CERN 연구소 연구원, 미국 Fermi 연구소 연구원을 지냈다.