

절연거리 변화에 따른 적층된 YBCO 도체의 자화손실 변화

임형우, 이희준, 차귀수, 이지광\*  
순천향대학교, 우석대학교\*

Effects of the insulation thickness on the magnetization loss of the multi-stacked YBCO coated conductor

Hyoungwoo Lim, Heejoon Lee, Guesoo Cha and Jikwang Lee\*  
Soonchunhyang University, Woosuk University\*

**Abstract** - Loss in the multi-stacked HTS wires are affected by a number of factor, such as, number of wires used in the stack, direction of external magnetic field and insulation thickness between the wire. This paper examines the effects of the insulation thickness on the magnetization loss of the multi-stacked YBCO coated conductor. Measurements of magnetization loss were performed using 4 different type of multi-stacked wires and under various angle of external magnetic field.

Test results show that loss density per unit volume increased for YBCO coated conductors when thickness of insulation increased. Loss density per unit volume decreased for YBCO coated conductors when stacking number of tapes increased.

1. 서 론

임계온도 30K이 넘는 고온초전도체의 발견 이후 고온초전도 분야는 급속히 발전하여 현재 77K의 액체 질소를 냉매로 쓸 수 있는 고온초전도선체까지 급속히 개발되었다.

초전도 선체의 산업적 응용에 대해서는 기존의 전력 기기에 사용하는 구리선에 비해 저항이 매우 작아서 전력기기의 동손을 줄일 수 있는 장점이 있으며, 대용량의 전류를 수송할 수 있는 장점이 있고, 기존의 구리선을 사용하는 기기에서는 냉각과 절연을 위해 절연유를 사용하였는데 절연유 교체할 경우에는 폐유 처리에 따른 환경의 오염원이 되었으나, 초전도선을 이용하는 곳에서는 절연유 대신 액체 질소를 사용함으로써 환경 친화적이라 할 수 있다. 이러한 초전도선을 사용하는 분야로써는 기존의 구리선을 사용 했던 변압기 대신 초전도 선을 사용하는 초전도 변압기, 구리선이나 알루미늄을 사용하는 송전선로에서 더 많은 전력의 수송을 위해 전압을 높여 왔으나 절연 문제가 발생하여 전류 용량을 높이는 방안으로 제시한 것이 초전도 송전선이며, 이 밖의 응용분야인 초전도 한류기, 초전도 배터링 등이 있다. 이처럼 초전도를 응용하는 분야가 산업의 한 부분으로 확산되어 가고 있다. 그러나 대부분의 전력기기가 교류를 이용함에 따라 초전도 선에 직류가 아닌 교류를 인가하게 되고 그에 따라 초전도 선에 교류 자장이 가해짐으로써 초전도 선에는 교류 자장에 의한 교류 손실이 발생하게 되며 임계전류가 큰 폭으로 감소하게 된다. 또한, 기존의 1세대 초전도 선은 외부 자장이 가해졌을 경우 임계전류가 큰 폭으로 감소하는데 비해 새롭게 개발된 2세대 초전도 선은 외부 자장이 가해져도 1세대 초전도선보다 감소하는 비율이 작다[1][2].

본 논문에서는 2세대 초전도 선에 외부 자장이 가해졌을 경우 발생하는 교류 손실에 대해서 알아보았으며, 더 큰 전류 용량을 내기위한 방안으로 초전도 선을 적층

하는데 적층시 발생하는 교류손실과 절연 거리에 따른 교류손실에 대해서 실험적 방법을 이용하여 알아보았다.

2. 선재의 적층 및 실험 방법

2.1 선재의 구조 및 적층

2세대 고온초전도선(YBCO Coated Conductor)은 1세대 고온 초전도 선인 BSCCO tape와는 달리 그 제작 방법과 선재의 구조도 다르다. 1세대 초전도 선은 Powder-in-tube(PIT) 법을 이용하여 초전도 선을 제작하나 2세대 초전도 선은 IBAD-PLD 등과 같은 박막 증착 방법을 사용하여 제작한다.

그림 1은 2세대 고온초전도선인 YBCO CC의 단면 구조이다. 또한 오른쪽에는 실험을 위해 face-to-face 방법으로 적층한 한 것을 나타내고 있으며, 실험시 비절연일 경우 선재와 선재 사이에는 이물질이 없도록 하였고, 절연을 할 경우에는 일정한 전기적 절연거리를 만들어 주기 위해 절연용 필름을 100 $\mu$ m, 200 $\mu$ m, 300 $\mu$ m, 400 $\mu$ m 사용하여 절연 거리가 달라짐에 따른 자화 손실을 측정하였다.

본 논문에서 사용한 YBCO CC의 샘플은 표1에 있는 것과 같이 Ag layer는 1.2 $\mu$ m, YBCO layer는 1 $\mu$ m, Buffer layer는 2.04 $\mu$ m, Substrate layer는 60 $\mu$ m의 두께를 가진 샘플을 사용 하였으며, 샘플의 전체 폭은 8mm이다. 또한 이 샘플의 임계전류는 액체질소 내에서 166A였다.

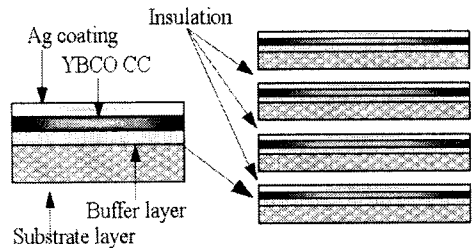


그림 1. YBCO CC의 구조 및 선재의 적층 구조

표 1. YBCO CC 사양

Width	8mm
Ag Thickness	1.2 $\mu$ m
YBCO Thickness	1 $\mu$ m
Buffer Thickness	2.04 $\mu$ m
Substrate Thickness	60 $\mu$ m
Ic	166A at 77K

## 2.2 실험 방법

자화손실 측정 회로는 측정 하고자하는 샘플에 외부에서 교류자장을 인가하여야 하므로 교류자장 인가용 전자기석이 필요하고 샘플에서 발생하는 자화에 의한 손실을 측정하기 위하여 Linked-Pickup-coil을 사용하였으며, 이와 같은 방법 외에도 Saddle-shape-coil법이나 Rectangular-coil을 사용하여 측정하는 방법 등이 있다[3-5].

그림 2는 본 실험에 사용한 회로 구성이며 자화손실 측정을 위한 회로도이다. Pickup-Coil과 Cancel코일은 지름이 50mm인 에나멜 선을 사용하였으며, 각각1000턴을 감아서 사용하였다. 초전도선재의 샘플은 픽업코일 내부에 위치한다. 외부자장이 인가되는 경우에 픽업코일에 유기되는 전압은 초전도선재 샘플에서 발생하는 자장과 외부자장과의 합성에 의해 나타나므로 초전도선재의 샘플에서 발생하는 자장만을 얻기 위해 픽업코일과 동일한 턴수의 캔슬코일을 픽업코일에 연결해 외부자장에 의한 유기기전력을 상쇄시킨다.

$$Q_m = \oint_s \vec{E} \times \vec{H} n ds \quad (1)$$

고온초전도선재의 자화손실은 균일한 외부자장을 고온초전도선재의 샘플에 인가할 때 발생하는 에너지의 유출입으로부터 얻을 수 있으므로 1주기 당, 단위길이 이 당 자화손실은 식(1)과 같이 표현 할 수 있다. 위의 식(1)에서,  $\vec{E}$  은 샘플을 따라 발생한 전계,  $\vec{H}$  는 외부 인가자계의 세기이다. 식(1)을 측정된 전압, 전류 신호로부터 고온초전도선재의 1주기 당, 단위체적 당 자화손실로 표현하면 식(2)를 얻을 수 있다.

$$Q_m = \frac{C_{mk}}{V_s} \int_0^T v(t) i(t) dt \quad (2)$$

위의 식(2)에서,  $k$ 는 자장인가용 코일자석의 단위 전류당 발생 자속밀도를 나타내는 자석상수이고,  $C_m$ 는 픽업코일 보정상수,  $V_s$ 는 샘플의 체적이다. 또한, 수직방향 외부자계에 의한 고온초전도 선재의 자화손실 계산은 두께가 매우 얇은 strip 형상에 대해서 Brandt가 제시한 strip model을 이용한 식(3)과 같이 계산 할 수 있다[6]. 식(3)으로부터 YBCO CC는 단일 선재에 외부자장을 수직으로 인가시켰을 경우에 적용하여 실험결과와 비교하였다.

$$Q = \frac{4a^2 J_c dB}{S} [ \frac{2}{\beta} \ln(\cos \beta) - \tan \beta ] \quad (3)$$

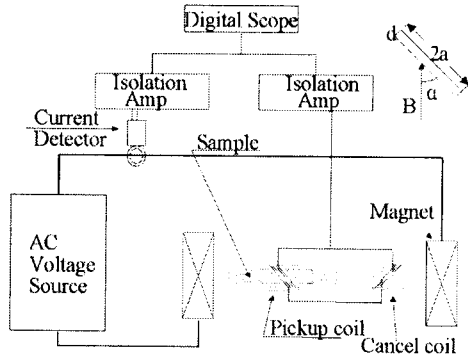


그림 2. 자화손실 측정 시스템

식(3)에서  $\beta = B/B_c$  이고,  $B_c = \mu_0 J_c d / \pi$  이며,  $a$ 는 샘플 폭의 1/2,  $d$ 는 두께이다.

## 3. 실험 결과

그림 3은 단일 및 선재를 비절연한 상태에서 2,3,4적층 하였을 경우에 대해서 나타낸 그림이다. 그림에서와 같이 단일 선재일 경우가 단위 체적당 자화 손실값이 가장 크며 적층의 수가 증가 할수록 자화 손실 값의 결과는 감소하였다. 또한 식 (3)인 해석 식을 이용하여 측정값과 비교해본 결과 실험값과 근사하였다. 해석값과 실험 값이 일치 하지 않는 것은 샘플의 제작과정 중 불순물에 의한 영향이 포함되어 있다고 할 수 있다.

그림 4는 YBCO CC의 자화손실 값에서 단일 샘플로 적층 선재에서 측정된 값을 나눈 값이다. 이 그래프로부터 단일 선재의 손실에 비해서 적층하였을 경우 손실의 비율이 얼마나 감소하는지 또한 외부자장의 증가에 따라서 손실값이 증가하는 경향을 알 수 있다. 그러나 그래프에서 나타내듯이 적층 수에 비례적으로 손실이 감소하고 있음을 나타내고 있지는 않다. 다시 말해서 단일 샘플을 1로보고 2적층 하였을 경우 손실이 2배 감소하는 것이 아니며 3적층 하였다고 하여 손실이 단일 샘플에 비해 3배 작아진다고 할 수 없다. 따라서 전력기에 적층을 하여 사용할 경우 적당한 용량을 선정하여 적층을 하는 것이 유리하다.

그림 5, 그림 6, 그림 7, 그림 8은 YBCO CC의 적층수가 2, 3, 4일 경우에 대해서 각각 절연 거리를 100 $\mu$ m, 200 $\mu$ m, 300 $\mu$ m, 400 $\mu$ m로 바꾸어 가며 측정한 그림들이다. 각각의 그림들 모두 적층을 할 경우 손실값이 작아지고 있다. 또한 그림 5에서 그림8까지의 결과로부터 절연거리가 증가 할수록 손실 값이 증가하고 있다.

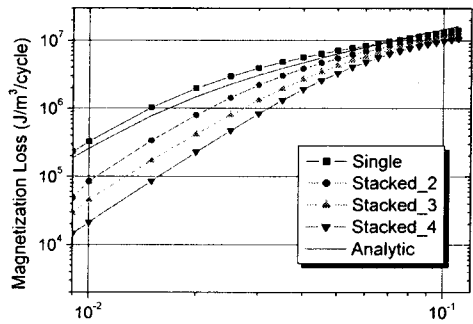


그림 3. 단일 및 비절연 적층 YBCO CC 수직자화손실

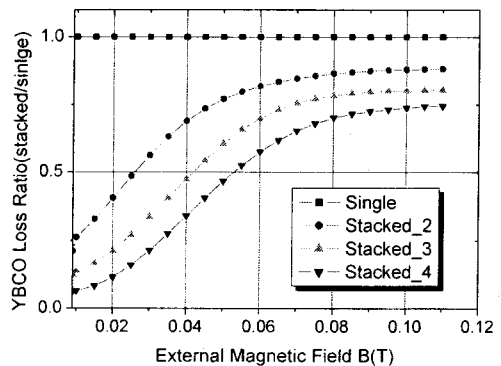


그림 4. YBCO CC의 단일 샘플과 적층샘플의 손실비

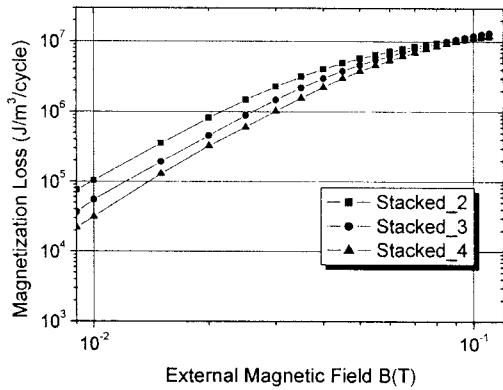


그림 5. 적층 선재의 100 $\mu$ m 절연시 수직 자화손실

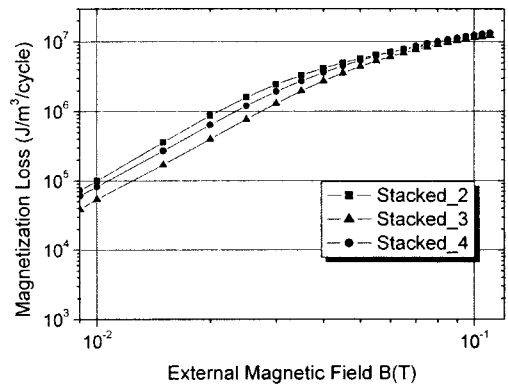


그림 8. 적층 선재의 400 $\mu$ m 절연시 수직 자화손실

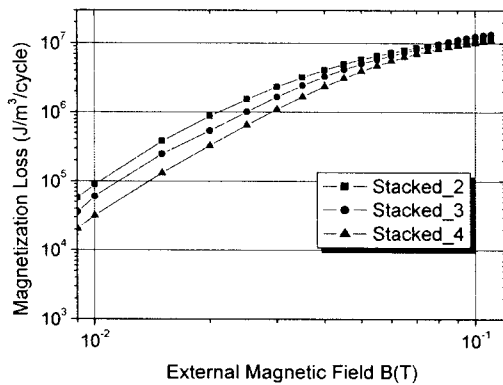


그림 6. 적층 선재의 200 $\mu$ m 절연시 수직 자화손실

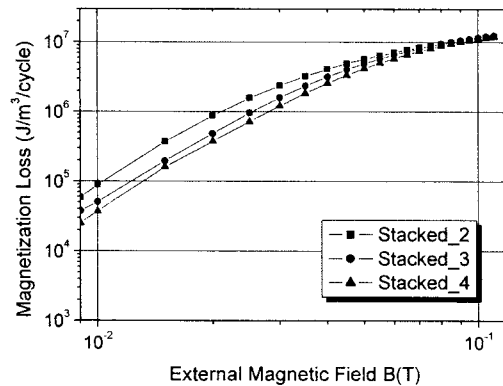


그림 7. 적층 선재의 300 $\mu$ m 절연시 수직 자화손실

#### 4. 결 론

본 논문에서는 2세대 초전도 선이 YBCO CC 에서의 자화에 의한 손실에 대해서 다음과 같은 방법을 이용하여 알아보았다. 첫 번째 인가하는 외부 자장의 크기가 증가할 경우, 두 번째 대전류를 통전시키기 위한 방법의 하나인 고온초전도 선재를 적층시켰을 경우 각각의 적층수에 따라 자장을 인가하였을 경우, 세 번째 적층시 선재와 선재 사이의 절연 거리를 다르게 하였을 경우이다.

그 결과 2세대 선재인 초전도 선재에 인가하는 자장의 세기가 커질수록 자화에 의한 손실은 증가하였으며, 적층수를 점차 증가 시켰을 경우 단일 선재에서 발생하는 자화 손실 값보다 감소하였다. 세 번째 절연 거리를 다르게 하였을 경우는 비절연의 경우 보다 컸으며, 절연 거리가 커질수록 자화에 의한 손실 값은 증가 하였다. 따라서 2세대 초전도 선인 YBCO CC를 대전력용에 적용하여 설계할 경우 전류 용량을 늘리기 위한 방법으로 적층하는 것은 자화 손실 측면에서 유리하다. 또한 절연을 해야 하는 경우에는 그 절연 거리를 최소로 하는 것이 자화손실 측면에서 유리하다.

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 차세대 초전도응용기술개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

#### [참 고 문 헌]

- [1] T. Watanabe, Y. Shiohara and T. Izumi, "Progress and Future Prospects of Research and Development on Coated Conductors in Japan," Trans. Applied Superconductivity, Vol. 13, no. 2, pp. 2445-2591, 2003.
- [2] V. Matias et al., "Accelerated Coated Conductor Program at Los Alamos National Laboratory," IEEE Trans. Applied Superconductivity, Vol. 13, no. 2, pp. 2488-2491, 2003.
- [3] Amemiya N. and Jiang Z., "Magnetization loss of YBCO Coated Conductors and BSCCO multifilamentary tapes," Supercond. Sci. Technol. 17 pp. 295-299, 2004.
- [4] Masataka Iwakuma, Keniro Toyota et al., "AC loss properties of YBCO superconducting tapes fabricated by IBAD-PLD technique," Physica C 412-414 (2004) pp. 983-991
- [5] J. J. Rabbers, "AC LOSS IN SUPERCONDUCTING TAPES AND COILS," Ph. D. dissertation, Dept. Elect. Eng., Twente Univ., 2001.
- [6] Ernst Helmut Brandt, "Type II superconductor strip with current in a Perpendicular Magnetic," Physical review B, Vol. 48, no. 17, 893-906, November 1993.