

외부자장인가 방향에 따른 YBCO CC의 자화 손실 특성

임형우, 이상수, 이희준, 차귀수, 이지광 *

순천향대학교, 우석 대학교*

Magnetization Losses in YBCO Coated Conductors According to Angles of External Magnet Field

Hyoungwoo Lim, Sangsu Lee, Heejoon Lee, Gueesoo Cha and Jikwang Lee*

Soonchunhyang University, Woosuk University*

Abstract - AC loss is an important factor in the development of superconducting tapes and superconducting power applications. In this paper, magnetization loss in YBCO coated conductor have been measured and compared with Brandt equation. Measurements of magnetization loss were performed under various angles of external magnetic field to consider the anisotropic characteristics of YBCO coated conductors. The results show that measured values of magnetization loss agreed well with the calculated value by using Brandt equation, especially at large degrees of incidence angle. The magnetization losses were strongly influenced by the direction of external magnet field as were expected.

1. 서 론

1986년 임계온도 30K이 넘는 고온초전도체의 발견 이후 고온초전도 분야는 급속히 발전하여 현재 77K의 액체 질소를 냉매로 쓰이는 고온초전도선제까지 개발되었으며 초전도 선제의 산업적 응용을 눈앞에 두고 있다.

고온초전도선제는 크게 1세대 초전도 선과 2세대 초전도 선으로 구분하고 있다. 1세대 초전도선은 사용한 중규모 초전도전력기기 개발되고 있는 하지만 1세대 초전도선은 자장이 인가되면 임계전류밀도가 큰 폭으로 줄어든다는 단점이 있어서 강한 자장이 발생하는 초전도전력기기에 사용하는 데에 어려움이 있다. 특히 테이프 형태의 초전도선에 외부자장이 수직한 방향으로 가해지면, 임계전류밀도는 현저히 이하로 감소한다. 1세대 초전도선의 임계전류밀도는 기존의 구리선보다는 100배정도 높지만 위에서 언급한 대로 강한 자장이 인가되는 경우에는 큰 폭으로 감소해서 초전도선을 사용하는 효과를 감소시킨다. 이러한 이유 때문에 임계전류밀도가 높고 자장이 인가되어도 전류밀도가 감소하는 정도가 적은 2세대 초전도선을 개발하기 위한 연구가 미국과 일본 등에서 진행되고 있고, 국내에서도 한국전기연구원 등에서 개발을 진행 중이다. 2세대 초전도 선제를 제작하는 방식에 따라 차이는 있지만 1세대 초전도선에 비해서 10배 이상의 전류 용량을 가지고 있으며, 외부에서 자장이 인가되었을 때의 전류밀도 감소도 1/5 이하이기 때문에 2세대 초전도선이 상용화되면 1세대 초전도선을 완전히 대체할 것으로 예상하고 있다[1],[2].

본 논문에서는 2세대 초전도선인 YBCO Coated conductor 샘플의 넓은 면에 가해지는 자장의 각도를 수직을 90°로 하여 70°, 50° 30°로 변화 시켰을 때 발생하는 자화 손실을 측정하였다. 또한, YBCO Coated conductor는 두께가 매우 얕으므로 브란트가 이론식으로 제시한 strip 모델에 대해서 외부 자장이 수직 방향으로 가해질 경우와 임의의 각도에서 가해질 경우를 실험값과

비교해 보았다.

2. YBCO Coated Conductor 자화손실

2세대 초전도선제는 기본적으로 4층 구조로 나타낼 수 있으며 다음과 같다. 기판위에 베퍼층을 증착시킨 후 베퍼층 위에 YBCO 초전도층 그리고 최종적으로 은 피복을 입힘으로써 YBCO Coated conductor 고온초전도체를 제작하며 YBCO Coated Conductor는 트위스트되어 있지 않다. 또한, 2세대 초전도체는 그 제작 공정에 따라 여러 가지 형태로 구분을 하며 일반적으로 기판, 완충층, YBCO층, 금속층으로 구성된다.

그림 1은 앞에서 설명한 2세대 초전도선인 YBCO Coated Conductor의 대표적인 구조이며, 이러한 구조의 단면을 나타낸 그림이다. 기판층의 역할은 크게 Coated Conductor의 기계적인 강도와 YBCO 결정격자를 만들어 주기 위해 사용하기도 한다. 완충층은 초전도층과 기판층의 절연 및 열화를 방지하기 위해 사용하며, 그 위에 YBCO Coated Conductor를 증착시킨다. 마지막으로 YBCO의 산화 방지 및 전류 용량이 넘었을 경우 초전도층이 소손되는 것을 보호하기 위하여 Ag로 코팅을 한다.

표 1은 실험에 사용한 YBCO Coated Conductor의 사양이다. 금속층인 Ag의 두께는 1.2μm이고 YBCO 층은 1μm, 완충층은 2.04μm이며 기판층은 60μm이다. 또한 YBCO Coated Conductor의 폭은 8mm로 가로대 세로의 비율이 1:8000으로 매우 크다. 또한, n -value는 $E-J$ 관계식(1)을 사용하여 계산한 결과 값이다. 이것은 J_c 측정 포인트마다 조금씩 다름으로 각각의 측정값들로부터 평균값을 취하였다.

$$E = E_c \left(\frac{J}{J_c} \right)^n \quad (1)$$

식 (1)에서 E_c 는 1세대 초전도선제의 임계전류 판단기준과 같이 $E_c = 1\mu V/cm$ 를 적용하였다.

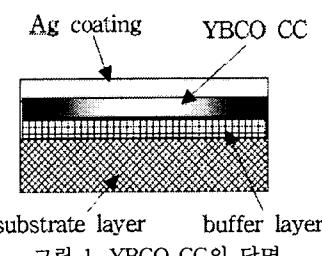


그림 1. YBCO CC의 단면

표 1 YBCO Coated Conductor의 사양

Ag 층	1.2μm
YBCO 층	1μm
완충층	2.04μm
기판층	60μm
I _c	166A
n-value	35.4

그림 2는 자화 손실을 측정하기 위해 구성한 회로도이다. 본 논문에서는 Linked-Pickup-coil을 사용하여 자화 손실을 측정하였으며 샘플의 각도를 바꾸어 임의의 방향에서의 자장은 인가하였다[3].

그림 3은 외부자장 인가 방향을 하고 90°, 70°, 50°, 30°로 바꾸어 가며 자화 손실을 측정한 결과이다. 이 그림 3의 결과로부터 자장의 인가 방향이 90°에서 30°로 점차 낮아질수록 자화 손실 값이 감소해 가고 있음을 알 수 있다. 이와 같은 결과로부터 초전도 선을 이용한 초전도 전력기기를 사용할 경우 외부자장이 인가되는 각도를 크게 함으로서 초전도 전력기기에서 발생하는 손실의 주 원인이 되는 자화 손실 값을 감소시킬 수 있다고 할 수 있다. 또한, 그림 4는 브란트가 제시한 식(2)을 식(3)과 같이 변경하여 외부자장의 각도를 변화시키며 실험했던 각도와 같이 90°, 70°, 50°, 30°로 바꾸어 가며 계산한 결과이다[4].

$$Q = \frac{4a^2 J_c d B}{S} \left[\frac{2}{\beta} \ln(\cos \beta) - \tan \beta \right] \quad (2)$$

이 식(2)에서 $\beta = B/B_c$ 이고 $B_c = \mu_0 J_c d / \pi$ 이며, a 는 폴의 1/2, d 는 두께이다. 식(2)은 YBCO Coated Conductor에 외부자장이 수직으로 가해질 경우 발생하는 자화손실 값이다. 그러나 위의 식(2)은 외부 자장이 임의의 방향에서 가해지는 경우에 대해서는 고려하지 못하고 외부자장이 수직으로 가해질 경우만을 고려함으로 $B = B \sin(\theta)$ 로 바꾸어 계산하였다. 따라서 식(2)을 다시 정리하면 다음의 식(3)과 같이 정리할 수 있다.

$$Q = \frac{4a^2 J_c d B \sin(\theta)}{S} \left[\frac{2}{\beta} \ln(\cos \beta) - \tan \beta \right] \quad (3)$$

식(3)에서 $\beta = B \sin(\theta)/B_c$ 이 식에서 YBCO Coated Conductor의 얕은 면에 가해지는 외부자장의 각도가 수직일 때 $\theta = 90^\circ$ 라 정하였다.

그림 4는 식(2)을 사용하여 측정 시 사용한 외부자장이 샘플에 인가되는 각도에 대해서 계산한 결과이다. 이 결과 역시 외부자장이 샘플의 얕은 면에 수직으로 가해지는 경우의 90°에서 30°로 점차 낮아짐에 따라서 자화손실 값이 감소하고 있음을 나타내고 있다. 그림 3과 그림 4의 결과로부터 외부자장의 세기가 세 질수록 자화손실 값이 증가하며, 이와 함께 샘플에 가해지는 외부자장의 각도가 수직일 때 가장 크며 외부자장을 인가시키는 각도가 점차 작아질수록 자화에 의한 손실 값이 점차 작아짐을 알 수 있다. 따라서 전력기기에 이를 응용할 경우 YBCO Coated Conductor에 외부자장의 세기를 줄이는 방법과 아울러 인가되는 자장의 각도를 줄이는 방법 역시 초전도 전력기기를 설계하는데 있어 중요한 요인이라 할 수 있다.

그림 3, 그림 4, 그림 5, 그림 6, 그림 7, 그림 8에서 θ_M 은 측정값이며 θ_C 는 계산 값이다. 그림 5, 그림 6, 그림 7, 그림 8은 앞의 그림 3과 그림 4에서 각도 별로 자화손실 값의 측정한 값과 계산한 값을 뽑아서 각

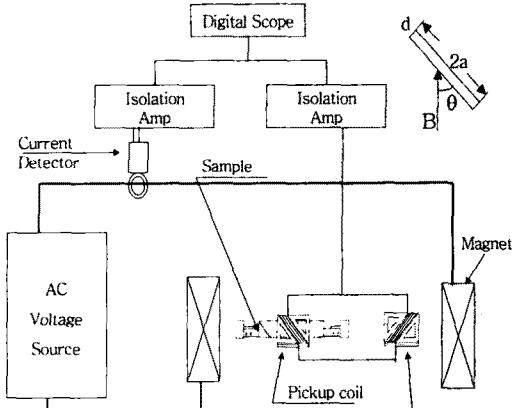


그림 2. 자화손실 측정 외부회로도

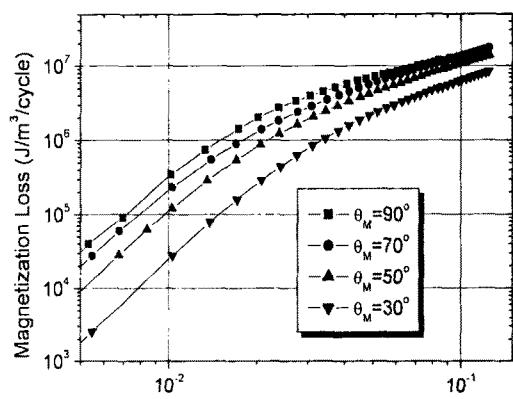


그림 3. 임의의 외부자장에 의한 자화손실 측정값

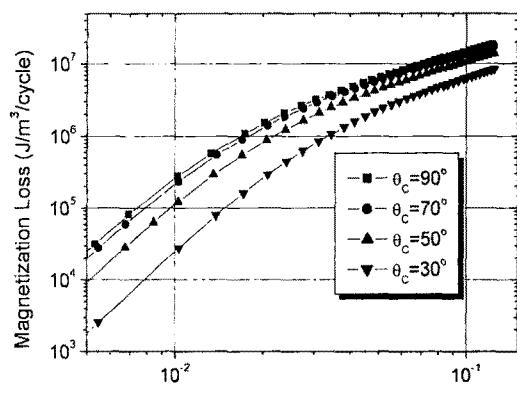


그림 4. 임의의 외부자장에 의한 자화손실 계산 값

각 비교해 놓은 것이다. 그림 5는 YBCO coated conductor에 외부자장을 샘플의 얕은 면에 수직으로 인가시켰을 경우에 대해서 계산한 것과 측정값을 비교한 것이며 이 그림에서 사각형 기호는 측정값이고 원형기호는 식(3)으로부터 얻은 결과 값이다. 그림 6은 샘플에 외부자장을 인가한 각도가 70°인 경우에 대한 그림이며, 그림 7은 샘플에 인가한 외부자장의 각도가 50°일 경우, 마지막으로 그림 8은 샘플에 인가한 외부자장과 샘플과 이루는 각도가 30°인 경우이다. 측정값과 실험값이 의

곡선을 이루는 점이 다르게 보이고 있으며 이러한 이유는 2세대 초전도선인 YBCO Coated Conductor는 식(1)에 있는 n-value가 큼으로 인한 것이라고 식(2)과 식(3)은 이러한 n-value를 고려하지 못하기 때문에 실현값과 계산 값의 그래프 경향이 차이가 있다.

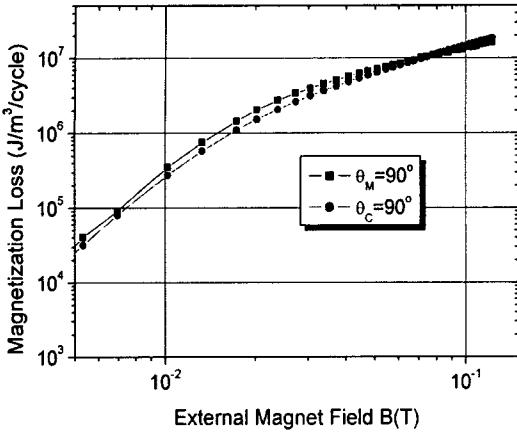


그림 5. 외부자장이 90°일 경우 자화 손실 값

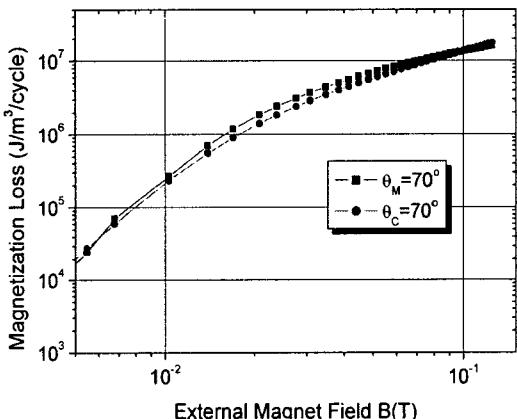


그림 6. 외부자장이 70°일 경우 자화 손실 값

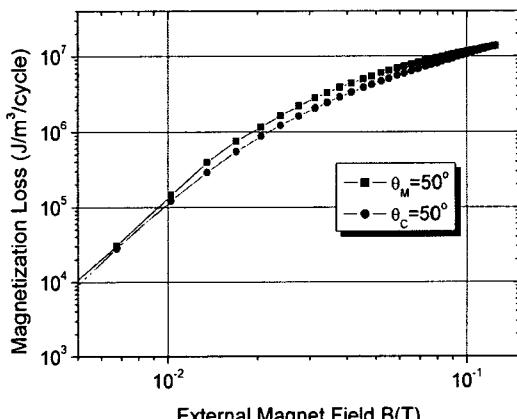


그림 7. 외부자장이 50°일 경우 자화 손실 값

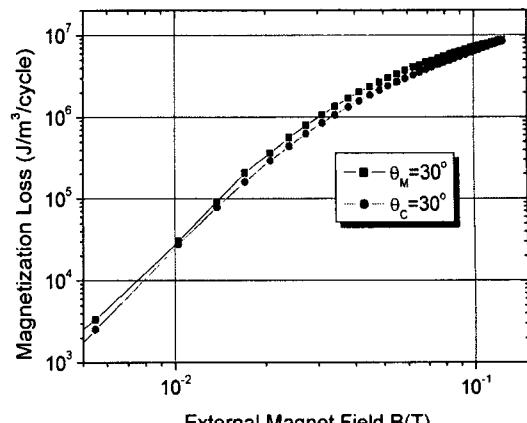


그림 8. 외부자장이 30°일 경우 자화 손실 값

3. 결 론

본 논문에서는 2세대 초전도 선인 YBCO Coated Conductor에 임의의 각도로 외부 자장을 인가시켰을 경우 발생하는 자화 손실에 대해서 실험을 하였으며, 이러한 실험값을 브란트가 제시한 무한 평판 모델인 strip 모델의 자화 손실 이론식과 비교하였다. 임의의 각도로 외부자장이 2세대 초전도 선재인 YBCO Coated conductor에 가해질 경우 실험에 의한 결과로부터 초전도선재에서 발생하는 자화 손실은 대부분 외부자장이 샘플의 넓은 면에 가해지는 방향 즉 수직 방향 성분에 의해 자화손실이 결정 된다고 할 수 있다. 따라서 초전도 전력기기를 설계할 때 선재에 가해지는 수직 방향성분이 적도록 한다면, 교류 손실에 의한 초전도 전력기기의 손실을 줄일 수 있을 것이다.

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 차세대초전도-용융기술개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행 되었습니다

[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] E.H. Brandt and M. Indenbom, "Type-II superconductor strip with current in a perpendicular magnetic field," Phys. Rev.B, vol. 48, pp. 12893-12906, Nov, 1993.