

적층 수에 따른 YBCO 선재의 전송전류 손실 특성

한병욱, 임희현, 강명훈, 임형우, 차귀수, 이희준  
순천향대학교

Characteristic of Transport Current Losses of Multi-Stacked YBCO Coated Conductors

Byungwook Han, Heehyun Lim, Myunghun Kang, Hyoungwoo Lim, Guesoo Cha, Heejoon Lee  
Soonchunhyang University

**Abstract** - Multi-stacked HTS tapes are needed to conduct large current in the power application of superconducting machine. This paper deals with the transport current loss of multi-stacked YBCO coated conductor. YBCO coated conductor that was used in this experiment has two Cu layers above and below of YBCO layer for stabilization. Transport losses of four different stacks, single, 2 stack, 3 stack and 4 stack, were measured. Measured results were compared analytic equation suggested by Norris.

가 발생하며, 이러한 교류 자계에 의하여 히스테리시스 손실이 발생한다. 초전도체에는 저항성분이 거의 없으며 저항성분에 비하여 인덕턴스 성분이 매우 크고 전압과 전류의 위상이 90°에 가까우며, 이러한 인덕턴스 성분을 줄여 주어야 한다. 이것을 위해서 회로도 안에 있는 Cancel Coil로서 선재 내에 있는 유도성 성분을 줄이고, 저항성분에 의해 발생하는 손실을 측정한다. 이 회로로서 BSCCO 선재와 YBCO 선재의 단일과 2, 3, 4 적층의 전송전류손실 측정실험을 하였다.

1. 서 론

1986년 임계온도 30K이 넘는 고온초전도체의 발견 이후 고온 초전도 분야는 급격히 발전하여 현재 77K의 액체 질소를 냉매로 쓰이는 고온 초전도선재까지 개발되었으며 초전도선재의 산업적 응용을 눈앞에 두고 있다. 이러한 산업에 응용을 하기 위한 초전도 전력기기들로서는 초전도변압기, 초전도유도기, 초전도한류기 등이 있으며 이들은 많은 양의 전류를 수송하거나 큰 자장을 만들기 위해 사용한다. 그러나 기존의 1세대 BSCCO 선재는 외부에서 자장이 가해지면 큰 폭으로 임계전류가 감소하는 단점이 있다. 이러한 단점을 보완하기 위해 2세대 선재가 개발되었다. 2세대 선재는 외부에서 자장이 가해져도 임계전류의 감소가 1세대 선재보다 작으며, 1세대 선재보다 수송할 수 있는 전류 용량도 크다. 따라서 2세대 선재를 이용한 전력기에 대한 연구가 활발해질 것으로 보인다. 초전도 선재는 저항이 없으므로 손실을 발생하지 않지만 교류전류가 흐르거나 교류자장이 가해지면 히스테리시스 손실이 발생하며 이를 교류손실이라 한다. 이러한 교류손실은 초전도 전력기기를 개발하는데 있어 큰 어려움을 야기 시키고 있다.[1][2]

본 논문에서는 1세대 선재와 2세대 선재에 교류 전류를 통전시켰을 경우의 통전손실을 측정하였고, 전류 용량을 증가시키기 위한 방법으로 사용하는 적층선재의 통전손실을 측정하였다. 1세대 선재, 2세대 선재 각각을 2, 3, 4 적층한 적층선재를 사용해서 이들의 통전손실을 측정하고 1세대 선재와 2세대 선재의 특성을 비교하였다. 또한 해석식을 사용해서 통전손실을 계산하였다.

2. 적층 선재의 전송전류

2.1 전송전류손실

고온초전도선재에 교류전류를 인가하면 이 교류전류로 인해 교류자장이 고온초전도선재의 주위에 형성되고, 이 자장은 부분적으로 고온초전도선재에 침투하게 되어 히스테리시스 형태의 손실을 발생시키게 되며, 이를 자기자계손실 혹은 전송전류손실이라 한다.

고온초전도선재의 전송전류손실은 다른 교류자계가 없을 경우, Norris가 제시한 타원형(Elliptical) 모델과 평판(Strip) 모델에 대한 해석식을 사용하여 계산할 수 있다. 다음 식은 전송전류손실로서 단위 길이당 손실로 표시한 것이다.[3]

$$P(F) = \frac{\mu_0 I_c^2}{\pi} \left[ (1-F) \ln(1-F) + (2-F) \frac{F}{2} \right] \quad (1)$$

$$P(F) = \frac{\mu_0 I_c^2}{\pi} \left[ (1-F) \ln(1-F) + (1+F) \ln(1+F) - F^2 \right] \quad (2)$$

식(1)과 식(2)는 각각 Norris의 Elliptical 모델, Strip 모델에 대한 해석식을 나타낸다. 수식에서  $F = I_p / I_c$ 이며  $I_c$ 는 임계전류,  $I_p$ 는 인가전류의 피크치이다.

2.2 실험방법

표 1은 1세대 선재인 BSCCO 선재와 2세대 선재인 YBCO 선재의 사양이다. 본 실험에 사용한 YBCO 선재는 상용화를 위해 개발된 선재로서 안정화 층이 Cu로 되어 있으며 선재의 위, 아래에 양면에 접합되어 있다.

그림 1은 전송전류손실 측정을 위한 회로도이다. 전송전류 손실은 선재에 교류전류가 흐를 때 시간에 따라 변하는 전류에 의해, 선재 주변으로 교류자계

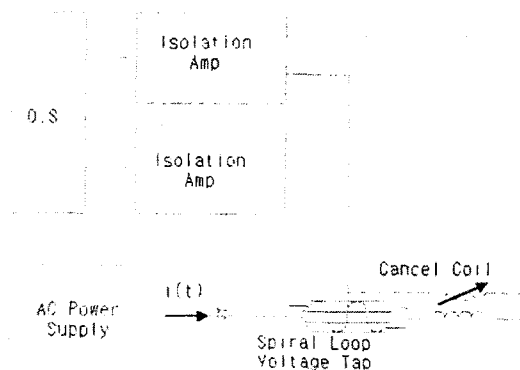
2.3 실험결과

그림 2에서 그림9까지는 BSCCO 선재와 YBCO 선재의 단일과 2, 3, 4 적층에서 발생한 전송전류손실의 측정값과 Norris 방정식을 사용하여 계산한 전송전류손실이다. 각 그림에서 네모로 나타낸 것은 측정값이며, 세모와 원은 각각 Norris 방정식의 Elliptical 모델과 Strip 모델로 계산한 결과값이다. 그림 2와 그림 3, 그림 4, 그림 5는 BSCCO 선재의 단일선재 및 2, 3, 4 적층선재의 측정값과 계산값을 보여 주고 있다. 전송전류가 낮은 구간에서는 측정치와 계산값이 차이를 보이지만 전송전류가 높은 구간에서는 Norris 방정식의 Elliptical 모델의 계산값과 잘 맞는다는 것을 알 수 있다. 그리고 BSCCO 선재는 단일일 때와 비교하여 적층의 수가 늘어남에 따라, 전송전류 손실 값이 증가하고 있다.

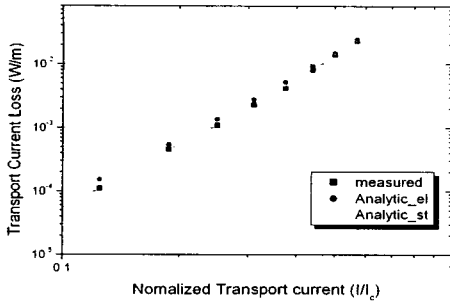
그림 6, 그림 7, 그림 8, 그림 9는 YBCO 선재의 단일선재 및 2, 3, 4 적층선재의 측정값과 노리스 식을 비교한 것이다. 전송전류가 낮은 구간에서는 측정치와 계산값이 차이를 보이지만 전송전류가 높은 구간에서는 Norris 방정식의 Strip 모델의 계산값과 비교적 잘 맞는다. 그리고 YBCO 선재에서는 단일선재와 비교하여 적층의 수가 늘어남에 따라, 전송전류손실 값이 감소하고 있다.

<표 1> 1세대 선재와 2세대 선재의 사양

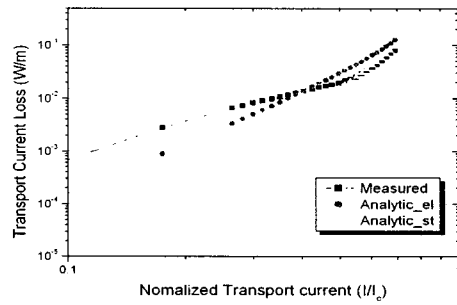
선재 종류	분류	값
1세대 선재 BSCCO wire	선재 폭	3.15mm
	선재 두께	0.17mm
	모재	Ag or Ag alloy
2세대 선재 YBCO wire	선재 폭	4.4mm
	선재 두께	0.2mm
	YBCO 층	1μm
	기판	Ni-W
	안정화층	Cu



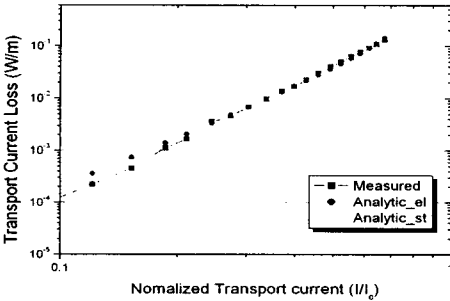
<그림1> 전송전류손실 측정회로



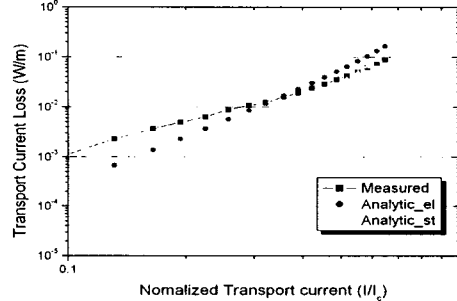
〈그림 2〉 BSCCO 단일 선재의 전송전류손실



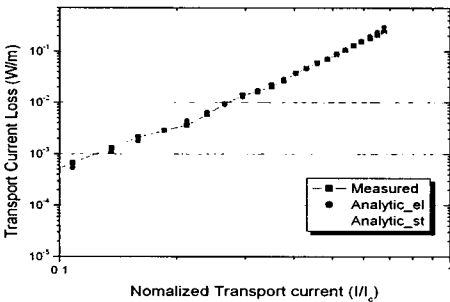
〈그림 7〉 YBCO 2적층 선재의 전송전류손실



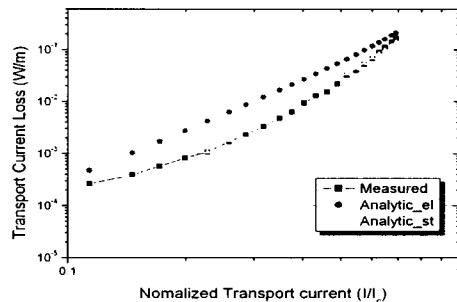
〈그림 3〉 BSCCO 2적층 선재의 전송전류손실



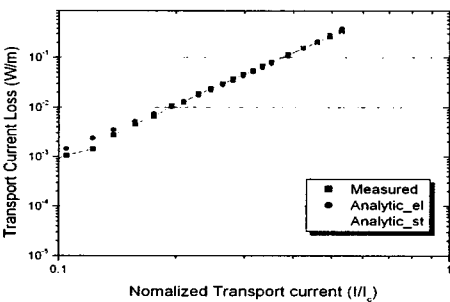
〈그림 8〉 YBCO 3적층 선재의 전송전류손실



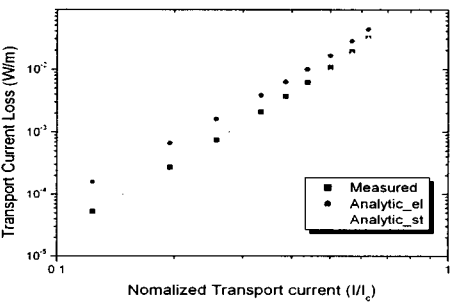
〈그림 4〉 BSCCO 3적층 선재의 전송전류손실



〈그림 9〉 YBCO 4적층 선재의 전송전류손실



〈그림 5〉 BSCCO 4적층 선재의 전송전류손실



〈그림 6〉 YBCO 단일 선재의 전송전류손실

### 3. 결 론

본 논문에서는 BSCCO 선재와 YBCO 선재에 교류 전류가 흐를 때 선재에서 발생하는 전송전류손실을 측정하여 계산값과 비교하였다. 그 결과 BSCCO 선재의 경우 Norris 방정식의 타원형 모델과 일치하며, YBCO 선재의 경우 Norris 방정식의 평판 모델과 비교적 일치하였다. 그리고 적층수에 따른 전송전류손실은 BSCCO 선재는 증가하지만 YBCO 선재는 감소하고 있다. 따라서 전류용량을 늘리기 위한 방법으로 적층을 할 때에는 1세대 선재인 BSCCO 선재보다 2세대 선재인 YBCO 선재를 사용하는 것이 전송전류손실 측면에서는 유리하다.

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

### 【참 고 문 헌】

- [1] K.Funaki, et al., "Development of a 22kV/6.9kV Single-Phase Model for a 3MVA HTS Power," Transformer, IEEE Trans. On Applied Superconductivity, Vol. 11, No. 1, pp.1578-1581, March, 2001.
- [2] 박찬배외 5인, "1MVA 고온초전도 변압기 개념설계 및 3차원 전자장 해석," 대한전기학회 논문지, 제 52권, 제1호, pp. 23-26, 2003
- [3] W.T .Norris, "Calculation of Hysteresis Losses in Hard Superconductors Carrying AC : Isolated Conductors and Edges of Thin Sheets, Journal of Phys. D: Applied Phys. Vol. 3, pp. 489-507, 1970.