

수치해석을 이용한 BSCCO 적층 선재들에 교류 통전시 발생하는 손실 계산

임형우, 한병욱, 차귀수, 이희준
순천향대학교

Numerical Calculation of AC transport current loss of stacked BSCCO wires

Hyoungwoo Lim, Byungwook Han, Gueesoo Cha, Heejoon Lee
Soonchunhyang University

Abstract -AC transport current losses is an important factor in the development of superconducting tapes and superconducting power applications. In this paper we compared measurement, calculation and Norris equation of AC transport current loss in BSCCO single and multi stacked wire. And present a distribution flux density and current density in the HTS single wire and multi stacked wire.

The result of Measurement and calculation of Ac transport current loss show that the same. And show that HTS characteristic of inside HTS wire.

1. 서 론

최근에 들어 산업이 발전하고 에너지 사용이 급격히 증가하므로 인하여 전력기기들의 교체를 고려하고 있는 실정에 용량 증가와 높은 효율성, 환경 친화적인가에 대한 요구가 높아지고 있다. 이와 같은 성능을 가진 전력기기들의 대안으로 많은 연구자와 개발자들이 고온초전도 전력기기들을 꾸고 있다.

고온초전도 전력기기들은 기본적으로 저항이 없으므로 전력기기의 에너지 효율을 증가 시킬 수 있으며, 기존에는 전력기기들의 냉각을 위해 절연유를 사용하는데 반면 액체 질소를 사용하므로 환경 친화적이고, 높은 전류 용량을 가지고 있으므로 기존의 구리선을 사용한 전력기기들보다 부피와 무게를 줄일 수 있다는 장점이 있다. 위와 같은 이유에도 불구하고 초전도 전력기기들의 개발이 늦어지는 것은 초전도체에 교류 통전을 시켰을 경우 발생하는 교류 손실 때문이다.

교류 손실은 외부자장이 초전도체에 가해질 경우 발생하는 자화손실과 교류 전류가 통전할 경우 발생하는 통전손실로 크게 나눌 수 있으며, 초전도체의 자화특성 때문에 수치적인 방법으로 손실을 계산하는 것이 어려워 간단한 해석을 사용하거나 측정을 하여왔다. 그러나 선재의 전류 용량을 증가시키기 위해 적층을 하거나 적층 형상을 변화시킬 때마다 매번 다수의 실험을 통해 그 특성을 측정해야 하므로 많은 시간과 비용을 들여야 한다. 따라서 시간과 비용을 절감하는 대안으로 해석적 방법에 의한 손실 특성을 얻기 위한 노력이 활발해지고 있다.[1]

본 논문에서는 해석적 방법을 이용한 초전도 선재의 전송전류 손실을 계산하였으며, 시간에 따른 초전도체 내부에서의 전류분포와 자속밀도 분포를 나타내었다. 계산에 사용한 선재의 샘플은 BSCCO선재이며 이를 단일, 2적층, 4적층으로 나누어 각각을 계산하였다. 또한 해석적 방법에 의한 손실계산이 맞는지를 비교하기 위하여 각각의 샘플을 제작하여 실험하였고. 이론식으로 제시된 노里斯 식과 비교하였다.

2. 전송전류 손실

2.1 초전도선재의 수치해석

본 논문에서는 많은 필라멘트를 갖는 BSCCO 선재를 코어 영역까지를 초전도 영역으로 가정하였으며, 통전과 외부자장의 변화에 따른 해석의 식은 다음과 같다. 식(1),(2)는 초전도체의 전압과 전류특성에 대한 $E-J$ 전력법칙과 저항률이다.[2]

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

$$\rho(E, B) = \frac{E_c^{\frac{1}{n(B)}}}{J_c^{(B)}} |E|^{-\frac{n(B)-1}{n(B)}} + \rho_0 \quad (2)$$

위의 식들에서 J_c 는 임계전류 밀도이고, E_c 는 임계전류 밀도이며, J 는 흐르는 전류이며, E 는 J 가 흐를 때 발생하는 전류, B 는 가해지는 외부 자장이다.

2.2 전송전류 손실

표 1은 본 논문에서 모델로 정한 선재의 사양이다. 고온초전도체의 전송전류 손실은 외부에서 가해지는 자장이 없고 통전전류만 있는 경우, Norris가 해석식으로 제안한 타원형 모델과 평판 모델에 대한 식으로부터 구할 수 있다. 이로써 구한 식은 단위길이당 한주기의 손실이다.[3]

$$P(F) = \left(\frac{\mu_0 I_c^2 f}{\pi} \right) \left[(1-F) \ln(1-F) + (2-F) \frac{F}{2} \right] \quad (3)$$

식(3)은 Norris가 제안한 타원형 모델의 해석식이며, 위 식(3)에서 $F = I_p/I_c$ 이고 I_p 는 전류의 피크치이며, I_c 는 선재의 임계전류이다. 본 논문에서 사용한 선재의 모델은 Bi-2223의 모델이며 이 모델은 타원형 형태의 초전도 영역을 이루고 있으므로 노里斯 이론식의 계산식을 타원형 모델로 하여 계산하였다.

다음의 그림 1은 전송전류손실 측정회로이다. 짧은 샘플임에도 불구하고 선재 길이에 의한 인덕턴스 성분 보다 저항 성분이 매우 작기 때문에 일반적인 샘플 양단의 전압 신호를 분석하면 대부분이 인덕턴스에 의한 전압 신호이므로 이를 제거하고 저항 성분만을 측정하기 위하여 켄슬 코일을 사용하였다.

표 1. BSCCO선재의 사양

종류	
임계전류(I_c)	Bi-2223 124A
폭	4.2mm
초전도체 두께	0.21mm
코어 영역	0.59
n-value	19.13
Ag 도전율	$2e^{-9} \Omega m$

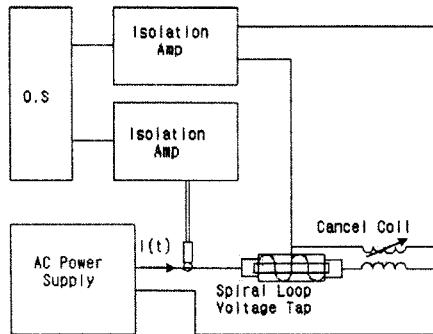


그림 1. 측정 회로도

2.2 해석결과 및 측정결과

그림 2는 단일 선재이고, 그림 3은 4적층 선재의 시간에 따른 전류 밀도의 변화를 나타낸 것이다. 시간은 $\theta = 0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ 일 경우이며 시간에 따라 전류의 분포가 초전도체의 경우 바깥부분부터 전류가 증가하여 내부쪽으로 변화하며, +의 전류와 -의 전류가 동시에 존재하는 초전도 특성이 나타나 있다.

그림 4와 그림 5는 초전도체 내부와 외부에서의 시간에 따른 자속밀도 분포를 나타낸 것이다. 흐르는 전송전류에 의해 발생된 자장이 초전도체 내부에 침투해 들어가는 것이 단일 선재와 4적층 선재 모두 잘 나타나 있다.

그림 6은 단일 초전도 선재의 전송전류 손실을 측정 및 해석 결과이다. 단일 선재의 임계전류 측정값은 124A이며, 해석에 의한 계산값은 124.1A였다. 이 그림에서 채워지지 않은 사각형의 기호는 해석 결과중에서 Ag와 초전도층에서 발생한 손실을 합한 결과이고, 채워

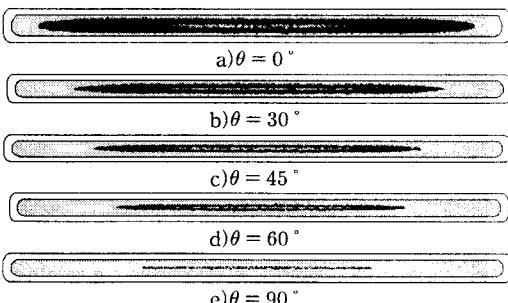


그림 2. 전류 110A에서 시간에 따른 전류밀도분포

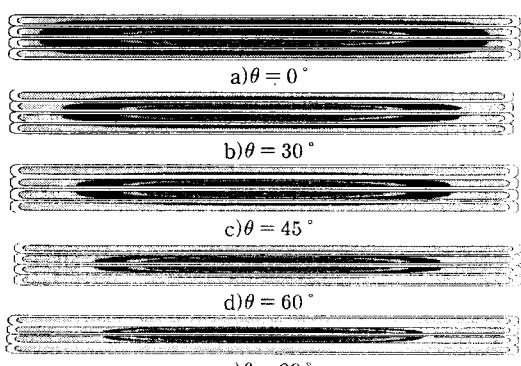


그림 3. 전류 350A에서 시간에 따른 전류밀도 분포

지지 않은 삼각형은 초전도층에서만의 손실을 나타낸 것이며 채워지지 않은 원형기호는 Ag에서의 손실만을 나타낸 것이다. 이 결과로부터 Ag가 초전도 선재의 전송전류 손실에 미치는 영향은 매우 작아서 초전도층과 Ag의 손실을 합한 결과와 초전도층에서 만의 손실 결과와 거의 같음을 알 수 있다. 또한 측정결과와 해석결과 그리고 노리스식에 의한 결과를 비교해 보았을 경우 잘 일치하고 있다.

그림 7은 2적층 선재의 전송전류 손실 측정 및 해석 결과이다. 2적층 샘플의 임계전류 측정값은 214A였으며, 해석결과에 의한 임계전류값은 214.7A였다. 2적층 샘플의 경우도 단일 선재의 경우와 같이 Ag의 손실과 초전도층에서의 손실을 합한 값이 초전도층에서 만의 손실값과 큰 차이가 없었으며, 해석에 의한 손실값과 측정에 의한 손실값이 잘 일치하고 있다.

그림 8은 4적층 선재의 전송전류손실의 측정 및 해석 결과이다. 4적층 선재의 경우 임계전류 측정값은 359A였으며, 360.7A였다. 이 그림 역시 앞의 그림 6과 그림 7의 결과와 같이 해석 값과 측정값 모두 잘 일치하고 있다.

그림 6, 그림 7, 그림 8로부터 해석에 의한 전송전류 손실값이 측정에 의한 손실값과 노리스식에 의한 손실값과 비교적 잘 일치하고 있으며, 단일 및 2적층, 4적층 선재들에서 Ag층이 전송전류 손실에 미치는 영향은 적음을 알 수 있다. 그러나 단일 선재의 은층의 손실 비율과 4적층 선재들에서의 은층의 손실 비율을 비교해 보았을 때 높은 전류가 흐름으로 인해 은층의 손실이 조금씩 증가하고 있다. 또한 해석에 의한 임계전류 값과 측정에 의한 임계전류 값이 잘 일치하였다.

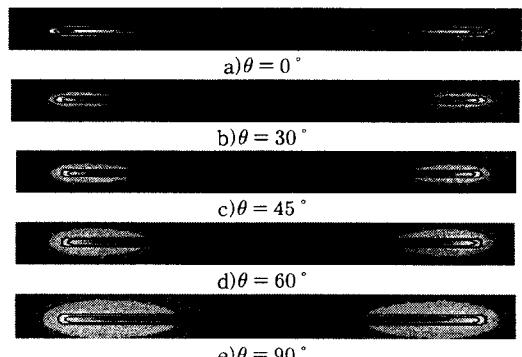


그림 4. 전류 110A에서 단일선재의 시간에 따른 자속밀도분포

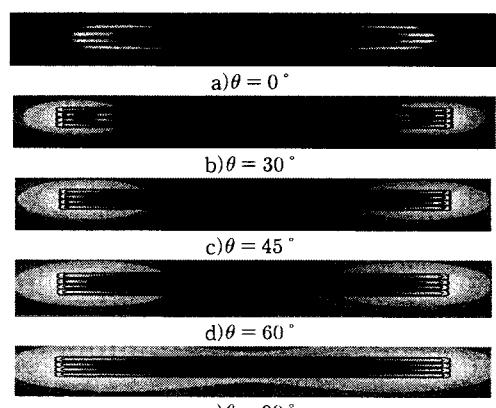


그림 5. 전류 350A에서 4적층선재의 시간에 따른 자속밀도분포

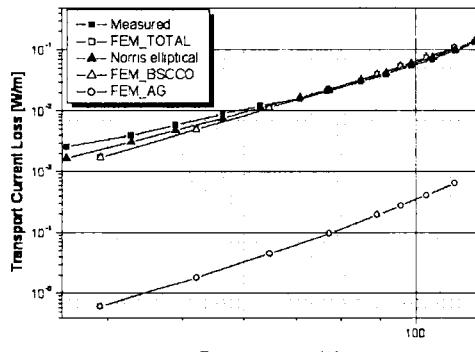


그림 6. 단일 선재의 전송전류 손실 측정 결과

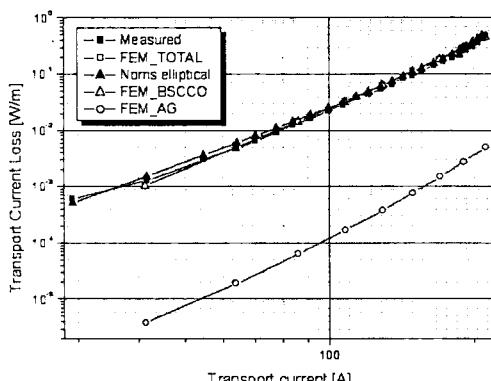


그림 7. 2적층 선재의 전송전류 해석 결과

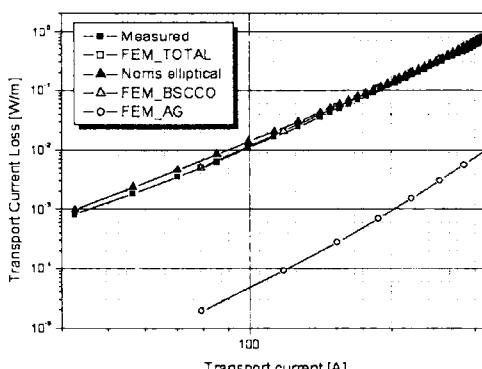


그림 8. 4적층 선재의 전송전류 해석 결과

3. 결 론

본 논문에서는 전송전류 손실을 수치적인 방법으로 계산하였고, 이를 측정한 결과와 노리스식을 이용해서 계산한 결과와 비교하였다. 단일 선재 및 적층 선재들의 임계전류 측정 값과 해석에 의한 측정 값 모두 잘 일치하였다. 또한 단일 및 적층 선재들의 전송전류 손실의 해석결과와 측정결과는 잘 일치 하였고 두 결과 모두 노리스 식과 잘 일치 하였다.

해석 결과로부터 Ag가 전송전류 손실에 미치는 영향은 낮은 전류에서는 100배 이상, 높은 전류에서는 100 가량 작아 그 영향이 미미하다고 할 수 있고 초전도층에서의 손실이 전송전류 손실의 대부분이다. 초전도체 내부에서의 시간에 따른 전류 밀도 분포와 자속밀도 분포를 나타낸으로써 초전도체 내부에서의 현상을 잘 알아 볼 수 있다. 따라서 이와 같은 결과를 이용하여 여러 형상의 초전도 선재에 대해서 실험을 하지 않고도 충분히 임계전류의 결과와 전송전류 손실의 결과를 예측할 수 있다.

[참 고 문 헌]

- [1] Francesco Grilli et al, "Finite-Element Method Modeling of superconductors:From 2 D to 3D," IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 15, No. 1, March, 2005.
- [2] J.Rhyner, "Magnetic properties and AC losses of superconductors with power law current-voltage characteristics," Physica V, vol. 212, pp.292-300, Jul. 1993.
- [3] W. T. Norris, "Calculation of hysteresis losses in hard superconductors carrying ac: Isolated conductors and edges of thin sheets," J. phys. D, Vol. 3, pp.489-507. 1970.
- [4] J. Ogawa., et al, "Comparison between experimental and numerical analysis of AC transport current loss measurement in YBCO tape in an assembled conductor," Physica C, 445-448, (2006), pp. 1083-1087.