

YBCO CC의 slit 개수에 따른 자화손실 저감 특성 해석

이광연*, 박명진*, 차귀수*, 이지광**

*순천향대학교, **우석대학교

Analysis on reduction characteristics of magnetization loss in YBCO CC by slit numbers

Kwangyoun Lee*, Myungjin Park*, Gueesoo Cha* and Jikwang Lee**

*Soonchunhyang University, **Woosuk University

Abstract - YBCO CC의 초전도 전력기기 응용에 대한 자화손실 저감을 위한 연구가 진행중이다. 본 논문에서는 임계상태 모델에 기초한 수치해석을 이용하여 슬릿 개수의 변화에 따른 YBCO CC의 자화손실 저감 특성을 해석하였다. 수치해석을 위한 YBCO CC의 규격은 두께와 폭이 각각 2μm, 4mm이며 슬릿에 의한 선재분할인 필라멘트는 각각 2,4,8개이다. 또한, 수치해석의 결과는 strip모델의 자화손실식과 비교하였다. 해석 결과, 자기적으로 결합되지 않은 strip모델 해석값과 수치해석값은 차이를 보였으며 필라멘트 개수의 변화에 따라 약 1/n 수준으로 자화손실이 저감됨을 확인하였다.

1. 서 론

최근 고온초전도 선재의 개발이 가속화됨에 따라 고온초전도 테이프선재를 이용한 전력기기의 개발이 활발히 진행되고 있다. 특히 이전의 BSCCO계열의 초전도 선재의 자기적 특성을 개선하기 위해 제 2세대 초전도선재로 불리우는 YBCO CC에 대한 연구의 필요성이 제기되고 있다. 고온초전도 선재를 교류조건하에서 사용하게 되면, 초전도체 고유의 자기적 특성으로 인하여 교류손실이 발생하게 된다. 교류손실은 외부자장이 초전도선재에 가해질 때 발생하는 자화손실과 초전도체에 흐르는 교류전류에 의해 발생하는 교류자장에 의한 전송전류손실로 나누어진다. 이러한 교류손실을 초전도특성을 고려하여 계산하기위해 많은 해석적방법과 수치해석 기법의 시도가 연구되어지고 있다[1]-[3].

실제 전력기기에 이용하기위해서는 선재를 코일형태로 권선하게 되며, 이때 코일에 교류전류가 흐르는 경우 권선부에 발생하는 자계는 선재에 외부자계처럼 작용하게 된다. 이러한 외부자계의 영향을 감소시키 교류손실의 주가 되는 자화손실을 감소시키기 위하여 초전도선재에 slit을 만드는 다심구조에 대한 연구가 필요하다.

본 논문에서는 초전도선재의 다심구조를 모델링하기 위해 필라멘트 개수를 각각 2,4,8개로 정하였으며, 필라멘트 개수에 따른 수직방향 외부자장하의 자화손실의 변화를 알아보기 위하여 Bean의 임계상태 모델(Critical stage model)을 기초로 한 2차원 유한요소법을 이용한 수치해석을 수행하였다. 그림 1은 8개의 필라멘트를 갖는 다심구조를 갖는 초전도선재를 나타낸다. 또한, 수치해석을 통해 계산된 자화손실의 값과 Brandt가 제시한 strip모델 계산값을 비교함으로써 인접하는 초전도체 영역과의 자기적 결합에 대한 영향을 분석하였다.

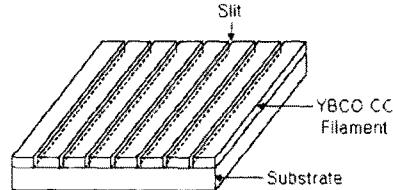


그림 1. slit을 갖는 YBCO CC의 다심구조 형상

2. 고온초전도 선재의 수치해석

2.1 수치해석방법 및 해석모델

다심구조를 갖는 YBCO CC의 자화손실의 계산은 인접 필라멘트와의 자기적 결합을 고려한 수치해석적 계산과 자기적 결합이 고려되지 않는 strip모델식에 의한 계산으로 나누어 수행하였다.

초전도선재의 외부자장에 따른 자화손실을 계산하기 위한 해석기법으로는 Bean의 임계상태모델(critical state model)과 Power law관계에 기초한 n-value모델을 이용한 기법이 있다. Bean의 임계상태모델은 고온초전도체의 느슨한 천이현상을 반영할 수 없는 단점이 있지만, n-value모델의 경우에 있어서 n 값의 크기가 충분히 큰 경우에 있어서는 두 해석결과가 잘 일치됨을 알 수 있다.[2]-[3].

본 논문에서는 초전도선재의 표면에 수직으로 인가되는 자장하의 자화손실값을 계산하기 위해 2차원 모델에 대한 단일선재의 수치해석을 하였다. 자화손실의 해석적 계산을 위한 전자기장의 식은 아래와 같이 멕스웰 방정식으로부터 나타낼 수 있다.

$$\vec{E} = -\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \nabla \phi \quad (1)$$

또한, 초전도선재 내부에서의 전류밀도 \vec{J}_s 는 Bean의 임계상태모델에 기초하여 식(2)와 (3)과 같이 결정되어진다.

$$\vec{J}_s = J_c \frac{\vec{E}}{|E|}, \text{ if } |E| \neq 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial \vec{J}_s}{\partial t} = 0, \text{ if } |E| = 0 \quad (3)$$

따라서, 식(1)과 식(2)로부터 계산된 전계 \vec{E} 와 초전도체의 전류밀도 \vec{J}_s 로부터 자화손실은 식(4)와 같이 나타

낼 수 있다.

$$Q = \int_0^T \int_v \vec{J}_{sc} \cdot \vec{E} dv dt \quad (4)$$

표 1은 수치해석에 사용된 YBCO CC의 사양을 나타낸다. 고온초전도선재에서 실제적으로 전류가 흐르는 초전도체 영역만을 해석하였다.

표 1. YBCO CC의 사양

종류	YBCO CC
임계전류(I_c)	200A
폭	4mm
초전도체 두께	2μm
초전도체 면적	8e-9m ²

그림 2는 초전도체 영역의 y축방향으로 확대된 자화손실 해석을 위한 해석모형을 나타낸다. 자장의 인가영역을 충분히 크게 하여 해석영역에서의 자장밀도의 균일성을 고려하였다. 또한, slit 개수에 따른 자화손실의 저감 특성을 해석하기 위하여 각각 2,4,8개로 동일한 단일선재의 단면을 나누었으며, slit의 폭은 1 μm로 정하였다. 실제 YBCO CC의 초전도체의 두께는 약 1~2 μm로 매우 얕고, 수직자장하의 자장 및 전류밀도의 형상이 대칭적이므로 1/2모델로 수치해석을 수행하였다. 초전도체 영역의 임계전류밀도 J_c 는 77K, 자기기자하에서 $2.5 \times 10^{10} A/m^2$ 이며, 무한전류원으로부터 발생되는 외부자장이 초전도체의 넓은 면에 수직하게 인가되도록 경계조건을 설정하였다. 또한, 외부인가자장의 범위는 10~100mT이다.

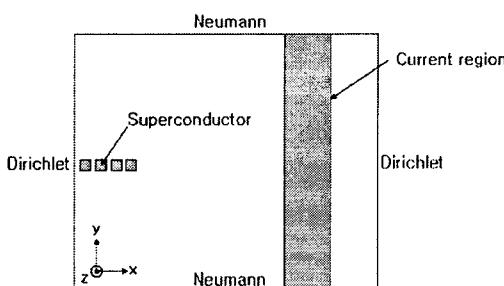


그림 2. 해석 모델

일반적으로 YBCO CC와 같은 두께가 매우 얇은 strip 형상의 자화손실값은 Brandt가 제시한 strip모델식(5)로 계산되어진다. 본 논문에서는 이 계산값과 수치해석의 결과값을 비교함으로써 여러개의 필라멘트를 갖는 구조에서의 인접 필라멘트로 인한 자기적 결합의 영향을 알아보았다.

$$Q_m = \frac{2B_a^2}{\mu_0} \frac{\pi w}{2\beta d} \left(\frac{2}{\beta} \ln(\cosh \beta) - \tanh \beta \right) \quad (5)$$

여기서 B_a 는 교류인가자장의 피크치 값이며, $\beta = \frac{B_a}{B_d}$, $B_d = \mu_0 J_c d / \pi$, d 는 선재의 두께, w 는 선재의 폭을 나타낸다.

낸다.

2.2 수치해석 결과 및 검토

그림 3은 $B_{ext}=30\sin \omega t [mT]$ 의 외부자장이 수직으로 인가될 때, slit을 갖지 않는 단심선재와 2,8개의 필라멘트로 구성된 다심 선재의 전류밀도 분포를 나타내었다. 그림에 삽입된 삽입그림에서의 slit의 폭은 1 μm이다. 그림에서 보이는 것처럼 각각의 필라멘트는 개개의 인접 필라멘트에서 발생하는 자장의 영향을 받으나, 대략의 전류밀도분포는 개개의 초전도체임을 나타낸다.

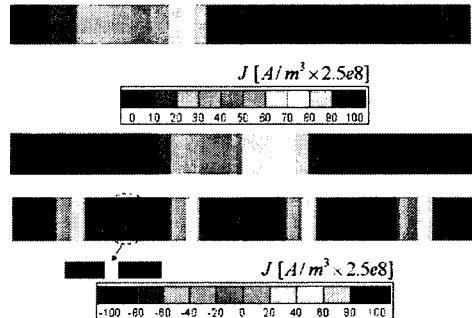


그림 3. 초전도선재의 전류밀도 분포

그림 4는 10~100 mT의 피크값을 갖는 외부인가자장의 1주기 동안에 발생되는 초전도체 내의 자화손실값을 단위체적당의 크기로 나타낸 것이다. 그림에서 속이 찬 심볼과 속이 빈 심볼은 각각 수치해석에 의한 자화손실값과 strip모델식에 의한 자화손실의 계산값을 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 필라멘트의 개수를 증가시킴에 따라 1/필라멘트 개수의 비율로 자화손실이 저감됨을 나타내며, 비교적 작은 값을 갖는 자장영역에서는 인접한 필라멘트에서의 자장의 영향이 고려되지 않는 strip모델식의 계산값 보다 그 영향이 고려되는 수치해석의 자화손실값이 크다. 이는 작은 값의 외부자장 하에서는 slit 부분에서 발생하는 인접 필라멘트에서 발생하는 자장이 자화손실의 값에 큰 영향을 미치는 반면에, 큰 값의 외부자장 하에서는 이러한 영향이 외부자장의 영향에 비해 크지 않음을 나타낸다. strip모델식에 의한 계산값은 각각의 필라멘트에 대한 계산값(단위체적당의 크기)을 나타낸다.

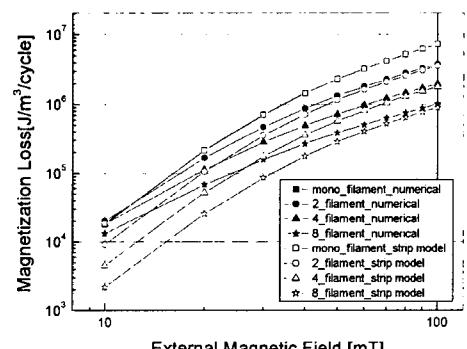


그림 4. 다심선재의 자화손실값 비교

그림 5는 단심선재의 strip모델식 자화손실값으로 정규화 된 각각의 다심 필라멘트 모델에 대한 자화손실값을 나타낸다. 정규화 된 다심 필라멘트 모델의 손실은 다음

과 같은 식으로 계산되어진다.

$$\text{정규화된 자화손실값} = \frac{\text{자화손실값}}{\text{단심 strip모델 계산값}} \quad (6)$$

여기서, strip모델식의 계산값은 단심 선재에 대한 계산값이며, 자화손실값은 각각의 필라멘트에서의 strip모델 계산값 및 수치해석값의 평균값을 나타낸다. 그럼에서 알 수 있듯이, 필라멘트의 개수를 증가시켜 선재를 다심화할 수록 strip모델식의 계산값은 1/필라멘트의 개수의 비율로 감소되며 수치해석의 결과값은 외부자장의 크기에 따라서 그 감소비율이 달라짐을 알 수 있다.

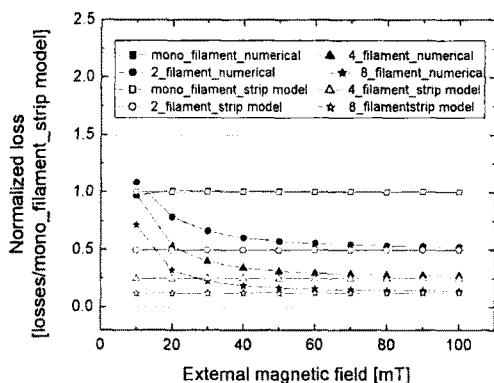


그림 5. 정규화된 자화손실값 비교
(자화손실값/단심모델 자화손실값)

그림 6는 필라멘트 개수의 변화에 따른 다심선재의 각각에 대한 strip모델식 계산값과 수치해석값과의 비교를 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이, 다심선재의 경우 단심선재와는 달리 strip모델식 계산값과 수치해석값은 필라멘트의 개수가 증가할 수록 낮은 외부자장하에서는 차이가 크며, 외부자장의 크기가 증가할 수록 그 차이가 줄어든다. 비교적 낮은 자장인 외부자장의 피크값이 30mT인 경우에는 2,4,8개의 slit 모델에서 정규화된 계산값과 수치해석값의 차이는 각각 1.32배, 1.60배, 1.83배를 나타내며, 높은 자장인 100mT인 경우에는 정규화된 계산값과 수치해석값의 차이는 각각 1.05배, 1.09배, 1.12배를 나타낸다.

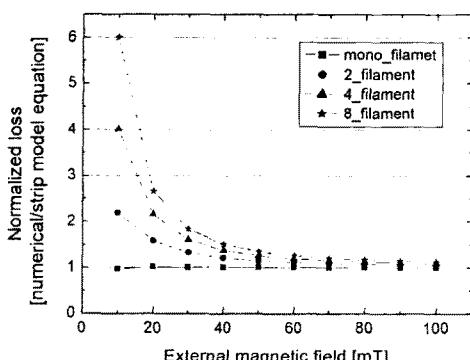


그림 6. 정규화된 자화손실값 비교
(수치해석 자화손실값/strip모델 자화손실값)

3. 결 론

본 논문에서는 다심구조를 갖는 단일선재의 자화손실 저감특성을 알아보기 위해 임계상태 모델을 기초로한 수치해석과 두께가 얇은 형상에 적용되는 strip모델의 자화손실식을 이용한 손실값의 계산을 수행하였다. 연구결과를 볼 때, 낮은 외부자장하에서는 인접 필라멘트에서 발생하는 자장의 영향으로 인해 수치해석의 결과값이 계산값보다 약간 크기는 하지만 다심구조의 형상에 의해 자화손실값이 1/필라멘트 개수의 수준으로 감소됨을 확인할 수 있었다. 단일선재의 짧은 샘플의 경우에는 이러한 다심구조에 따른 자화손실의 저감효과를 기대할 수 있지만, 실제응용에서의 코일의 형태나 전류도입선의 연결의 경우에는 전기적으로 완전한 slit의 조건을 유지할 수 없으므로, 자화손실의 실제 응용에서의 효과를 증대시키기 위해서는 다심 필라멘트를 트위스트 하는 것과 같은 다른 방향의 연구가 더욱 필요하다.

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

[참 고 문 헌]

- [1] Ernst Helmut Brandt, and Mikhail Indenborn, "Type-II-superconductor strip with current in a perpendicular magnetic field," Physical review B, vol. 48, No. 17, pp. 893-906, 1993.
- [2] Kengo Miyamoto, Naoyuki Amemiya, Nobuya Banno, Masayasu Torii, Eiki Itatasa, Eiji Mizushima, and Tomoyuki Nakagawa, "Measurement and FEM analysis of magnetization loss in HTS tapes," IEEE Transaction on applied superconductivity, vol. 9, No. 2, pp. 770-773, 1999.
- [3] Svetlomir Stavrev, Bertrand Dotoit, and Nadia Nibbio, "Geometry considerations for use of Bi-2223 /Ag tapes and wires with different models of $J_c(B)$," IEEE Transaction on applied superconductivity, vol. 12, No. 3, pp. 1857-1865, 2002.
- [4] R. Schlosser, H. Schmidt, M. Leghissa, and M. Meinert, "Development of High-temperature Superconducting Transformers for Railway Application," IEEE Transactions Applied Superconductivity, Vol. 13, No. 2, 2325-2340, June 2003.