

고온 초전도 선재에서의 통전 손실 해석

최세용, 이준호, 나완수, 장석현*, 주진호*, 정재훈**, 류경우**
성균관대학교 정보통신공학부, *성균관대학교 금속재료공학부
**전남대학교 전기공학과

Analysis of transport current loss in HTS tape

Seyong Choi, Joonho Lee, Wansoo Nah, Seok Hern Jang, Jinho Joo,
Jaë-Hoon Jung, Kyung-Woo Ryu
School of Information and computer Eng., SungKyunKwan University,
*School of Metallurgical and Materials Eng., SungKyunKwan University,
**Dept. of electrical engineering, Chonnam University

conny1@nature.skku.ac.kr

Abstract - In this paper, we described the procedures of AC transport current loss in HTS tape. To carry out the calculation, A- Φ formulation was introduced and two dimensional FEM was used for computation. The results were showed that ellipse shape was higher loss compared to rectangle one and these were almost same behavior of analytical results predicted by Norris. A comparative analysis of loss for various n-value variation was also presented.

1. 서 론

지난 수년간에 걸친 연구로 인해 초전도체를 전기적으로 응용하기 위한 개발들이 이루어지고 있으며, 초전도 변압기, 모터, 케이블 등에 상용화를 위한 노력들이 계속되고 있다. 특히 고온 초전도체의 경우 선재화를 통해 전기적인 적용이 가능하게 하였으며, 활발한 연구들이 계속되고 있다.

초전도체의 대표적인 특성인 영저항성으로 인해 직류에서 사용 시 무시할만한 손실만이 발생된다. 하지만 초전도 응용장치들이 기존의 전기적인 설비들과 함께 사용되기 위해서는 교류환경에서의 사용이 필수적이다. 직류에서의 운행상황과는 대조적으로 교류 전원 혹은 교류 환경에서 사용되는 초전도체는 손실을 발생시키며 이를 교류손실이라 한다. 교류 손실을 일으키는 원인은 크게 교류 전원에 의해서 발생하는 통전 손실(transport current loss)와 교류 자기장에 노출됨으로써 발생하는 자화손실(magnetization loss)로 구분할 수 있다.

Bean[1]에 의해서 임계상태모델(critical state model)에 기반한 초전도체에서의 교류손실이 제시된 후에, 여러 연구자들이 초전도체의 교류손실 해석을 위한 연구를 진행해 왔다. 특히

수치해석 기법이 발전하면서 유한차분법, 유한요소법, 경계적분법과 같은 다양한 방법들을 통한 교류손실해석 시도가 이루어져왔다.

본 논문에서는 고온 초전도 선재에서 발생하는 교류손실을 해석하고 분석하였다. 유한요소법을 이용하여 해석을 수행하기 위해 지배식을 정식화하였다. 2차원장으로 문제를 모델링하여 고온 초전도 선재에서의 전류밀도 분포 및 전계 분포를 계산하였으며 이를 바탕으로 통전전류에 의한 교류 손실을 해석하였다. 통전전류의 크기에 의한 손실 해석 결과를 기존의 해석식[2]과 비교하였으며, 인덱스 값(n value)에 의한 초전도 선재에서의 손실도 비교 분석하였다.

2. 고온 초전도 선재에서의 교류손실해석

2.1 초전도 특성 모델링

초전도 선재는 특유의 전압-전류 특성을 가지며 이는 다음과 같은 power-law로 표현할 수 있다.

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

여기서, E_c 와 J_c 는 자기 초전도에서 상전도로의 전이기준이다. $E_c = 1 \mu\text{V}/\text{cm}$ 의 전계 기준에서 임계전류를 결정하며 그때의 임계전류밀도가 바로 J_c 이다. E , J 는 각각 전계의 세기와 전류밀도를 의미하며 n 은 인덱스 값을 의미한다. 보통 인덱스 값은 초전도 선재의 전압-전류 특성 곡선으로부터 기울기의 가파른 정도를 표현하며, 실험적인 결과들로부터 도출되고 0.1~1 $\mu\text{V}/\text{cm}$ 의 전계 범위에서 근사 된 값으로 결정하는 것이 가장 일반적이다[3].

그림 1에서는 식 (1)의 관계에서 인덱스 값(n)에 따른 전압-전류 특성을 도시하였다. n 이 1인

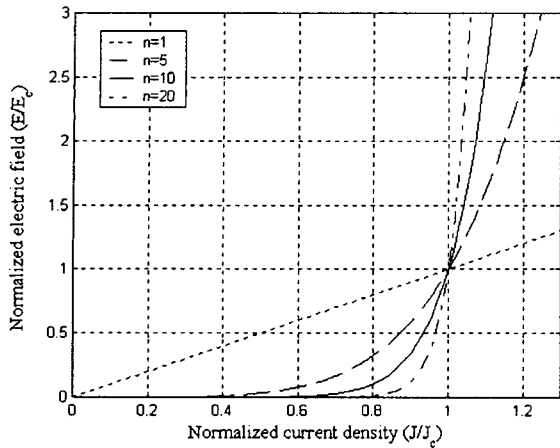


Fig. 1. HTS E-J characteristics for various index value

경우는 일반 도체의 경우이며 고온 초전도 선재의 경우 일반적으로 n 이 10~20의 특성을 보인다. n 이 ∞ 쪽으로 다가갈수록 임계상태모델(critical state model)에 근접해진다.

2.2 FEM 해석

고온 초전도 선재에서의 통전전류 손실을 해석하기 위해서 2차원 유한요소법을 이용해서 해석을 수행하였다. 해석을 위한 지배식은 암페어 법칙으로부터 유도되었으며, 자기벡터포텐셜 (A)과 전기스칼라포텐셜 (ϕ)을 사용하여 정식화되었으며 이를 정리하면 식 (2)와 같다(4).

$$\nabla \cdot \frac{1}{\mu} (\nabla A_z) = \sigma E_z, \quad E_z = -\frac{\partial A_z}{\partial t} - \nabla \phi \quad (2)$$

여기서 A_z , ϕ 는 각각 자기벡터포텐셜과 전기스칼라포텐셜을 나타낸다. 정식화 과정에서 사용된 변수들은 2차원장에서 모두 초전도 선재의 축방향인 z 방향 성분들이다. σ 는 초전도체에서의 전기전도도를 모델링 한 것으로 식 (1)에서 정의된 전압-전류 관계식으로부터 초전도체에서의 전기전도도 ($\sigma = E/J$)가 식 (3)과 같이 정의된다.

$$\sigma = \frac{J_c}{E_c} |E|^{-\frac{n-1}{n}} \quad (3)$$

제시된 지배식들은 갤러킨법을 이용하여 유한요소법에 적용되었고 공간적, 시간적으로 이산화되어 조립된 후 해석을 수행하게 된다. 본 논문에서는 유한요소법의 기법을 이용하여 공간적으로 삼각요소를 분할시켰으며, 시간적으로는 시간차분법을 도입하여 교류 전류의 변화에 따른 고온 초전도 선재에서의 전류밀도분포를 계산하고 이를 바탕으로 교류손실을 계산하였다. 그림 2에서는

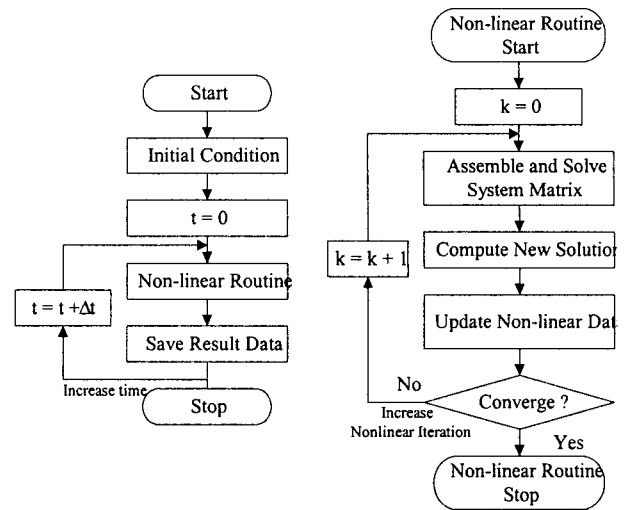


Fig. 2. Flow chart of the whole procedure of numerical calculation



Fig. 3. Cross section of superconducting tape for numerical calculation

제시된 지배식을 바탕으로 한 계산순서의 흐름도를 도시하였다.

그림 2와 같은 해석과정을 통해서 각 시간 단계별로 초전도 선재 단면에서의 전계 및 전류밀도분포를 얻어내었으며 이를 바탕으로 식 (4)와 같은 통전전류 손실을 얻을 수 있다.

$$Q = \int_T \int_S \mathbf{E} \cdot \mathbf{J} dS dt \quad (4)$$

해석에 사용된 고온 초전도테이프의 사양은 임계전류(I_c)가 130 A이고 인덱스 값(n)이 20이었다. 또한 초전도 선재의 가로 및 세로의 길이가 4.1×0.21 mm이며 초전도 필라멘트의 사이즈는 3.9×0.15 mm이다. 해석을 위해서 초전도선재의 모양은 타원형태(elliptical shape)와 직사각 형태(rectangular shape)로 모델링 하였으며 이때 각 형태에서의 초전도 필라멘트 단면적은 4.56×10^{-7} m²으로 동일하였다. 초전도 선재의 단면사진을 그림 3에 도시하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 교류 통전 전류 손실

그림 4에서는 모델링 한 초전도 선재에 50 Hz의 정현파 교류 전류를 입력했을 때, 통전전류 손실을 임계전류에 대해 정규화한 전류의 크기로 도시한 그림이다. 전술한 바와 같이 모델링 한 초전도 선재는 타원형태와 직사각 형태이며 이때 각 형태에 대한 통전손실을 도시하였으며 이와 함께 Norris[2]에 의해 제시된 타원형식과 스트립

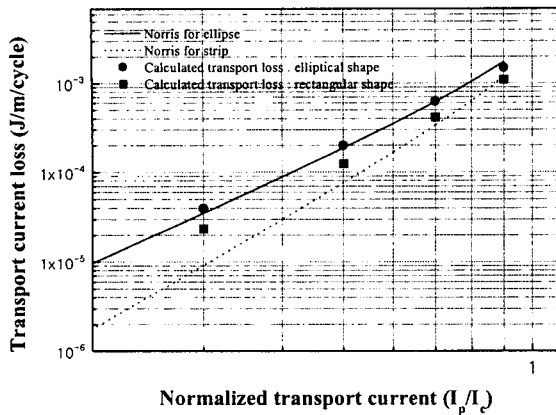


Fig. 4. Comparison of AC transport current loss between elliptical shape and rectangular shape

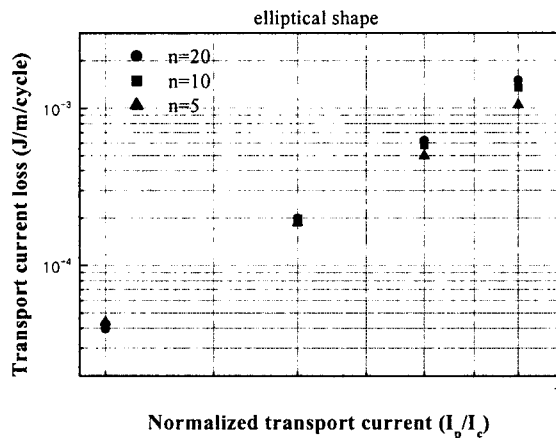


Fig. 5. Calculated transport current loss for various n value

해석식도 도시되었다. 그림에서와 같이 수치해석 결과 타원형 단면이 직사각형 단면보다 높은 손실값을 보였다. 이는 임계상태 모델에 기반하여 제시된 Norris식에서 타원형 식이 스트립 식보다 높은 손실을 보이는 것과 정성적으로 동일한 경향을 보인다고 할 수 있다. 또한 상대적으로 느슨한 전압-전류 특성을 보이는 고온 초전도 선재의 n -value 모델에서도 통전전류 손실을 예측할 수 있음을 의미한다. 임계상태모델에 비해 n -value 모델에서는 인덱스 값이 상대적으로 작은 고온초전도체에서의 특성을 잘 반영하고 있으므로 교류 상황하에서의 손실값 이외에도 초전도 선재 단면에서의 전류밀도 분포를 정확히 예측할 수 있다.

3.2 인덱스 값에 따른 교류 통전 전류 손실

그림 1에서 제시한 다양한 인덱스 값에 따른 통전전류 손실을 해석하였고 이를 그림 5에 도시하였다. 그림에서 보이는 바와 같이 인덱스 값이 각각 $n=5$, $n=10$, $n=20$ 인 모델에 대해서 해석

을 수행하였다. 해석결과 저 전류 영역에서는 손실값의 차이를 보이지 않으며 임계전류에 인접해 갈수록 인덱스 값에 따라 차이를 보이는 것으로 해석되었다. 이는 통전전류가 임계치로 다가갈수록 저항성 손실이 커지게 되므로 n 값에 의존하는 경향을 보이는 것으로 사료된다. 하지만 본 해석결과와는 power-law에 기반한 n -value 모델에 의한 것으로 해석결과는 저 전류 영역에서 다소 차이를 보일 수 있다. 특히 접합선재와 같이 초기에 선형전압 성분을 보이는 경우는 초전도 특성의 모델링에 있어서 새로운 모델을 제시해야 할 것으로 보인다.

4. 결 론

본 연구에서는 고온 초전도선재에서의 교류 통전전류손실을 해석하였다. 해석에는 2차원 유한요소법이 사용되었으며 초전도 물질특성을 반영하기 위해서 n -value 모델을 도입하여 해석을 수행하였다. 계산 결과 형상에 따라 손실값의 차이를 보였다. 초전도 선재의 필라멘트가 타원형으로 모델링된 경우가 직사각형태보다 더 큰 손실값을 나타냈으며 이는 Norris에 의해 예측된 해석식과 동일한 경향을 보임을 알 수 있다.

n 값에 따른 통전전류손실은 저 전류 영역은 유사한 손실 경향을 보이지만 고전류 영역에서는 다소 차이를 보이는 것으로 해석되었다. 이들 결과로부터 일부 구간에서 정의된 인덱스 값에 의해 제시된 n -value 모델은 실제 손실과 다르게 나타날 수 있으며, 특히 초전도 선재간의 접합된 경우와 같이 초기 선형 전압-전류 특성을 갖는 고온 초전도 선재의 경우에는 변형된 n -value 모델을 도입해야 할 것으로 판단된다.

(감사의 글)

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(과제번호 : R01-2000-000-00248-0)의 연구비 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

(참고 문헌)

- [1] Bean C P, "Magnetization of hard superconductor", Phys. Rev. Lett 8, pp250-253, 1962
- [2] Norris W T, "Calculation of hysteresis loss in hard superconductors...", J.Phys.D:Appl Phys.,3, pp489-507, 1970
- [3] Donglu Shi, "High-Temperature superconducting materials science and engineering", Elsevier, pp262-265, 1955
- [4] S Stavrev et. al., "Comparison of numerical methods for modeling superconductors", IEEE Tr. on Magnetics, Vol38, No. 2, pp849-852, 2002