

교류용 초전도선의 결합손실해석

심정욱, 차귀수, 이지광, 최경달*, 한송엽*
순천향대학교 전기·전자공학부, *서울대학교 전기공학부

Numerical Analysis of The Coupling Loss in AC Superconducting Wires

Jungwook Sim, Gueesoo Cha, Jikwang Lee, Kyeongdal Choi*, Songyop Han*
Soonchunhyang University, *Seoul National University

Abstract

The external magnetic field which is applied to the superconducting wire generates coupling loss. Analytical method has been used for the calculation of the coupling loss. This paper calculates the coupling loss that is generated in the matrix by the external magnetic field. Two-dimensional Finite Element Method has been used for the calculation.

1. 서 론

초전도선에 외부자계가 인가될 때 모재에서 발생하는 결합손실은 시스템의 효율에 영향을 미칠 뿐 아니라 온도상승의 원인이 되어 극저온 안정성을 해치게 된다. 효율산정과 극저온 안정성 향상을 위해서 초전도선에서 발생하는 손실을 정확하게 계산할 필요가 있기 때문에 본 논문에서는 횡방향 자계에 의해 모재에서 발생하는 결합손실을 계산한다. 초전도체에서 발생하는 결합손실을 계산하기 위해서 일반적으로 해석적인 방법을 사용하고 있으나 초전도체의 형상이 복잡해짐으로 모재와 필라멘트와의 분포에 대한 점적율이 같더라도 소선의 형태나 필라멘트의 크기, 배치에 따른 결합손실을 해석적 방법으로는 정확한 해를 구할 수 없어서 본 논문에는 수치적 방법을 사용한다. 외부에서 인가되는 시변자계에 의해서 각각의 필라멘트에 유기되는 전압을 구하고 이를 경계조건으로하여 2차원 수치해석을 행하여 계산한다.

2. 해석적인 계산

일반적으로 교류용 초전도소선은 상전도체인 모재 안에 초전도체로 만들어진 직경이 수 내지 수십 μm 정도의 필라멘트들이 박혀있는 형태로 구성되어 있으며 이 필라멘트는 소선의 축방향으로 꼬여 있다.

필라멘트 전체에 대하여 해석하는 것은 어려우

므로 축방향으로 꼬여있는 임의의 두 필라멘트를 해석한다. 그림 1(a)에서처럼 초전도 선재의 축에 대하여 외부에서 횡방향으로 시변자계가 가해지면 선재 내의 임의의 두 필라멘트 사이에는 외부자계에 반발하는 결합전류를 형성하는 전위차가 발생한다. 초전도체로 구성된 필라멘트 내에는 전계가 존재하지 않으므로 필라멘트를 따라서는 등전위를 이루고, 그림 1(b)에서처럼 임의의 폐회로에 유기된 전위차에 의해서 상전도체인 모재 부분에 결합전류가 발생한다.

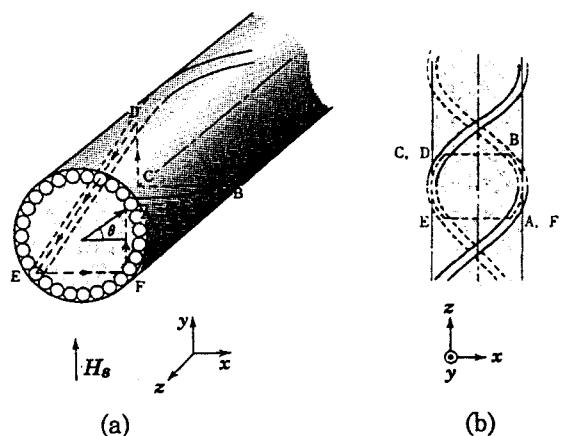


그림 1. 소선의 필라멘트사이에 흐르는 결합전류

그림 1과 같은 구조를 갖는 복합 도체에서 결합 손실은 다음과 같이 계산할 수 있다.[1]

$$P_c = 4\pi \frac{B_m^2}{2\mu_0} \frac{2\pi f^2 \tau_s}{(2\pi f \tau_s)^2 + 1}, \quad \tau_s = \frac{\mu_0}{2\rho_\perp} \left(\frac{l_p}{2\pi} \right) \quad (1)$$

3. 수치적인 계산

3.1 필라멘트의 전위

그림 1(b)처럼 트위스트된 필라멘트의 형상이 외부자계 측면에서 보았을 때 정현적인 모양이라고

가정하고 $B = B_m \sin \omega t$ 일 때 맥스웰방정식은

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2)$$

이 된다.

선재의 축방향을 z 라 하고, 선재의 중심에서 임의의 필라멘트 중심까지의 거리 R 을 이용하여 식(3)을 유도할 수 있다.

$$\int \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{\partial}{\partial t} \int B_m \sin \omega t 4R \cos \theta dz \quad (3)$$

트위스트피치(l_p)와 이에 따른 z 축 변화에 따른 각 θ 와의 관계를 이용하여 $t=0$ 에서 $x=0, y=0$ 인 점을 기준($V=0$)으로 하는 전압은

$$V(R, z) = \frac{l_p}{2\pi} B_m w R \sin\left(\frac{2\pi}{l_p}\right) \quad (4)$$

이고 이 식을 이용하여 임의의 필라멘트에 유기되는 전압을 구한다.

3.2 해석모델

식(4)에서 구한 임의의 필라멘트에 유기되는 전압은 2차원 유한요소법을 사용할 때에 경계조건으로 주어져 각 요소에서의 전계를 구하는데 사용한다. 그림 2는 선재의 수치해석 모델이다.

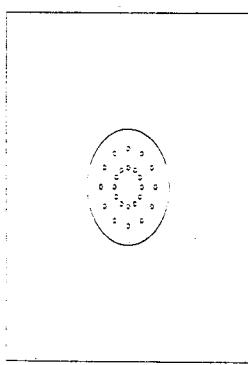


그림 2. 해석 모델

해석 모델은 초전도소선에 있는 필라멘트들이 일정한 반경으로 배치되어 있다고 가정을 하고 각 필라멘트에는 외부자장에 따른 각 각도에 대한 경계조건을 주었다. 여기서 사용한 소선의 사양은 CuNi로 된 모재에 24개의 필라멘트들이 2층으로 배치되어 있는 형태를 채택하였다.

4. 계산사례

본 논문에서는 트위스트피치에 따른 결합손실의 영향, 축방향의 변화에 따른 결합손실의 변화 등에 따른 해석을 위해 그림 3에서처럼 해석모델을 요소로 분할했다.

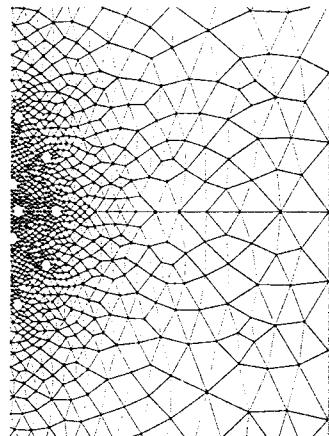


그림 3 요소분할도(확대한 그림)

계산에 사용된 소선의 반경은 0.075mm, 각 필라멘트의 반경은 3.125μm이다. 트위스트 피치의 변화에 대한 손실을 계산하기 위해 각각 1.0mm, 1.4mm, 1.8mm의 트위스트피치를 주었고 고여있는 필라멘트의 z 축 방향에 따른 결합전류의 분포를 보기 위해 축방향에 따른 해석도 시도하였다.

계산에 사용된 선재의 사양은 다음 표1과 같다.

표 1. 초전도소선의 사양

소선의 반경	$R_w = 7.5 \times 10^{-3}$ [m]
필라멘트의 반경	$R_f = 3.125 \times 10^{-6}$ [m]
외부자장의 최대치	$B_m = 0.2$ [T]
트위스트 피치	$l_p = 1.0, 1.4, 1.8 \times 10^{-3}$ [m]
필라멘트 수 및 층수	$N_f = 24, 2$ 층
모재의 종류 및 도전율	CuNi $\sigma_m = 5.988 \times 10^6$ [Ω/m]
소선중심에서 각층의 필라멘트중심까지의 반경	$R_{f2} = 2.5 \times 10^{-3}$ [m] $R_{f2} = 5.0 \times 10^{-3}$ [m]

4.1 소선내의 결합전류

트위스트 피치의 변화에 따른 해석값과 수치적으로 해석한 값들을 비교해보면 트위스트 피치가 작을수록 손실이 줄어든다는 것을 알 수 있다.

각 트위스트 피치에 따른 손실을 보면, $z=0$ 인 점에서 트위스트 피치가 1.0mm일 경우 수치해석적 방법에 의한 결합손실값은 322.8 [W/m^3]이고 필라멘트 상호간의 길이가 같다는 가정 하에 도출된 기준

의 해석식에 의해 계산한 값은 $379[\text{W}/\text{m}^3]$ 으로서, 수치해와 해석해와의 차이는 약 14.8%정도이다. 트위스트피치를 1.4mm, 1.8mm정도 주었을 때의 각각의 수치해석에 의한 결합손실값은 $632.8[\text{W}/\text{m}^3]$, $1046[\text{W}/\text{m}^3]$ 이고, 해석식에 의한 손실값은 각각 $742.7[\text{W}/\text{m}^3]$, $1227.8[\text{W}/\text{m}^3]$ 으로서 이들의 차이 역시 14.8%정도의 차이를 보인다.

표 2. 수치해와 해석해의 비교

트위스트 피치	수치해	해석해	차이
1.0[mm]	$322.8[\text{W}/\text{m}^3]$	$379.0[\text{W}/\text{m}^3]$	14.8%
1.4[mm]	$632.8[\text{W}/\text{m}^3]$	$742.7[\text{W}/\text{m}^3]$	14.8%
1.8[mm]	$1046.0[\text{W}/\text{m}^3]$	$1227.8[\text{W}/\text{m}^3]$	14.8%

초전도소선의 반경이 같고 필라멘트들의 갯수들이 같더라도 해석해에서는 소선의 형태나 필라멘트들의 크기 및 배치에 대한 고려분이 적용되지 않기 때문에 수치해와 약간의 차이가 존재한다. 이것은 결합손실을 계산하는데 있어서 소선의 형태와 필라멘트크기 및 배치가 소선 내에서 발생하는 손실에 영향을 미침을 알 수 있다.

4.2 소선내의 결합전류

소선내의 정전장 분포는 2가지의 경우에 대해서 비교해 보았다. 선재의 z 축 방향의 변화에 따른 분포를 고려하기 위해 트위스트 피치 내에서 다른 단면의 정전장분포와 결합전류의 방향을 수치해석하였다.

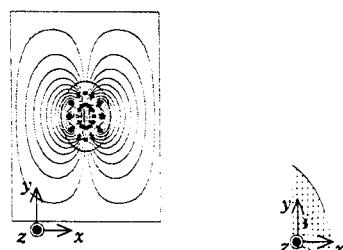


그림 4. 등전위선분포와 결합전류($l_p=1.4\text{mm}, z=0$)

그림 4에는 $x=0$, $y=0$ 이고 $z=0$ 인 부분에서의 등전위선 분포와 결합전류를 보여 주는 그림이다. 그림에서 외부자계가 x 축 방향으로 가해질 때 초전도 소선에의 모재에는 외부인자계의 세기의 변화에 대하여 반발하는 방향으로 결합전류가 흐름을 볼 수 있다. 이때의 수치해석에 의한 손실값은 $632.835[\text{W}/\text{m}^3]$ 이다.

초전도소선의 축방향의 변화에 대한 손실을 보기 위해 축방향에 대해서 필라멘트의 피치가 $l_p/24$ 인 부분에서의 손실을 계산해 보았다. 그림 5를 보

면 $z=l_p/24$ 인 위치에서의 등전위선 분포와 결합전류를 보여주고 있다.

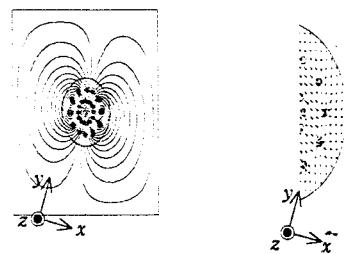


그림 5. 등전위선분포와 결합전류($l_p=1.4\text{mm}, z=l_p/24$)

그림 5에서 보면 등전위선 분포는 그림 4에서의 등전위선 분포와 다르게 보이지만 기존의 모델의 각 필라멘트에 $z=l_p/24$ 일 때의 경계조건을 주어 해석한 것으로서 그림 4일 때와 같은 형태의 등전위선과 결합전류를 보여준다. 이때의 수치해석으로 구한 손실은 $632.822[\text{W}/\text{m}^3]$ 으로서 $z=0$ 일 때의 손실과 0.002%의 차이로 거의 같다. 이것은 z 축 방향의 다른 점에서의 손실들과 비교하여도 0.002%정도의 차이가 있어서 어느 점에서 수치해석을 하더라도 거의 근사한 해를 구할 수 있음을 볼 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 횡방향의 외부자계가 가해질 경우 균일하게 배치된 다심 초전도 소선의 결합손실을 해석하였다. 횡방향 자계에 의한 손실은 트위스트피치의 변화에 따라 손실값의 차이가 있음을 알게되었고, 소선의 축방향에 따른 손실의 변화는 수치적해석에 있어서 영향을 거의 미치지 않음을 알 수 있었다. 무엇보다도 수치해석적방법을 사용하면 기존계산식에 적용되지 못했던 소선의 형태나 필라멘트의 배치 등에 대한 부분이 고려할 수 있으므로 복잡한 구조의 선재에 대한 계산이 가능하다.

(참 고 문 헌)

- [1] J. R. Cave and A. Fevrier, "Calculation of AC Losses in Ultra-fine Filamentary NbTi Wires", IEEE Trans. Magnetics, Vol. 23, No.2, 1987, pp. 1732-1735
- [2] K. Kanvara, "Transverse Field Loss of Superconducting Wires Consisting of Filaments with High Resistive Boundaries," Cryogenics, Vol.27, 1987, pp.495-502
- [3] G. B. J Mulder and E. M. J Niessen, "Coupling Losses of Multifilamentary Superconductors Having Several Concentric Regions and Mixed Matrix," IEEE Trans. Applied Superconductivity, Vol.3, No.1, 1993, pp.142-145