

다심 초전도 선재의 결합손실 해석

이지광*⁰ 한송엽*
 서울대학교 전기공학과

COUPLING LOSS ANALYSIS OF SUPERCONDUCTING WIRE

J.K. Lee*⁰ S.Y. Hahn*

* Dept. of Electrical Engineering, Seoul National University

Abstract

Multifilamentary superconducting wires exposed to an alternating field generate the coupling loss and hysteresis loss. The geometric shapes of multifilamentary superconducting wire are very complicate, and loss generating mechanism is too.

In this paper, coupling loss of superconducting wire in case of twelve filament is calculated by two dimensional numerical analysis, and compared with value of conventional formulua. The basic idea of this calculating method is potential difference of external transverse field.

1. 서론

각종 초전도 관련 응용연구에 사용되는 초전도 선재는 안정화를 위하여 극세의 필라멘트(filament)가 모재(matrix)속에 박혀 있으며 필라멘트로 흐르는 전류밀도가 임계치를 넘지 않도록 하기 위해 임계길이와 관련한 트위스트 피치(twist pitch)로 필라멘트들이 꼬여 있는 형상을 하고 있다. [1] 이와 같은 극세 다심 복합선으로 하여 사용되는 초전도 선재에서 발생하는 손실은 시변 외부 자계가 가해질 때, 초전도 재료인 필라멘트에서 발생하는 히스테리시스(hysteresis) 손실과 필라멘트 사이의 모재에서 발생하는 결합(coupling) 손실 등이 있다. [2][3] 꼬여있는 초전도 선재의 특성에 의해 나타나는 결합손실은 그림 (1) 에서 보는 바와 같이 다수의 필라멘트가 모재를 통하여 임의로 조합되는 루프(loop)에 교번자계의 변화에 의한 유도전류가 발생하고, 그 유도전류로 인하여 모재에서 생기는 주울열(joule loss)이다. [4]

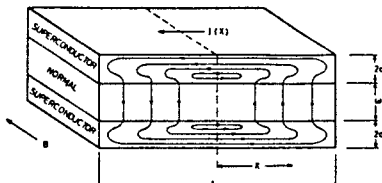


그림 1 유도 전류 흐름 경로
 Fig. 1 Path of induced current

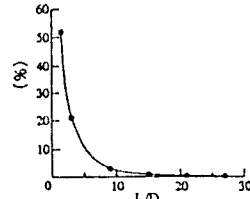


그림 2 축방향 유도전류 성분예 의한 전체 결합손실에의 영향
 Fig. 2 Effect of wire axis current component on total coupling loss

극세 다심 초전도 선재의 형상은 매우 복잡하며 유도전류의 발생 현상 또한 복잡하여 손실의 정확한 해석을 위해서는 3차원 해석이 필요하다. 그러나 통상의 초전도 선재는, 트위스트 피치(Lp) 대 선재 직경(D)의 비, Lp/D 가 5보다 크며, 이러한 조건을 만족하는 경우의 손실은 그림 (2) 와 같이 선재의 축방향 유도전류에 의한 손실이 전체손실의 10% 이하가 되므로 2차원 해석이 가능해진다. [5] 본 논문에서는 2차원 수치 해석에 의한 초전도 선재의 결합손실을 해석하고자 한다.

2. 해석 방법

선재에 uniform하게 작용하는 외부 인가 자계의 변화에 의해 그림 (3) 과 같이 트위스트된 임의의 두 필라멘트 사이에 유기는 전압은 다음과 같다.

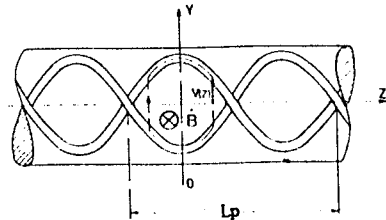


그림 3 필라멘트의 전위차 발생
 Fig. 3 Induced voltage V(z) on a filament

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad \text{식(1)}$$

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{\partial}{\partial t} \int B \cdot R \cdot \cos \theta dz \quad \text{식(2)}$$

$$V(R, Z) = \frac{L_p}{\pi} \cdot B_m \cdot \omega \cdot R \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{L_p} \cdot Z\right) \quad \text{식(3)}$$

B_m : 인가 자계의 최대치
 L_p : 트위스트 피치
 ω : 주파수 ($2\pi f$)

$x=0, y=0$ 인 점을 reference ($V=0$) 로 하는 임의의 필라멘트의 유기 전압은 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다.

$$V(R, Z) = \frac{L_p}{2\pi} \cdot B_m \cdot \omega \cdot R \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{L_p} \cdot Z\right) \quad \text{식(4)}$$

식 (4) 에 의해 해석 단면($z=0$)상에서의 각 필라멘트상의 유기 전압은 그림 (4) 과 같이 필라멘트의 이동으로 생각하여 구할 수 있다.

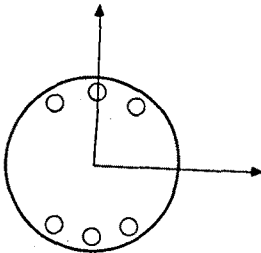


그림 4 필라멘트의 축방향 이동에 대한 단면상의 동가이동
 Fig. 4 Equivalent effect of three dimensional filament shapes to two dimensional

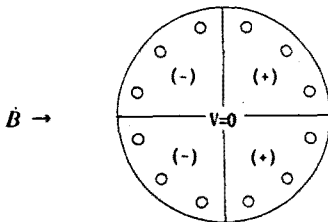


그림 5 선재 단면에서의 각 부분의 필라멘트 유기전압의 부호
 Fig. 5 Induced voltage sign of filaments

식 (4)에 의하여 유기된 필라멘트 전압은 외부 자계의 변화를 막는 방향으로 결합전류가 유기되도록 발생하므로 외부 인가 자계의 감소하는 반주기에 대해 각부분의 전압은 그림 (5) 와 같다. 그림(6)은 필라멘트의 수가 12인 경우의 2차원 요소 분할도이다. 식(4)에 의해 구해진 각 필라멘트 유기 전압을 경

계조조건으로 하여 $z=0$ 에서 얻어진 등전위선의 분포는 그림 (7) 과 같다. 그림 (6)의 각 요소의 node에서의 전압에 의한 각 요소의 전계값을 구하고 식 (5)에 의해 각 요소 면적 S 에 대한 손실을 전체 요소에 대해 합하므로써 결합손실을 구한다.

$$p = \sum_i \sigma_m \cdot E_i^2 \cdot \Delta_i \quad [W/m] \quad \text{식(5)}$$

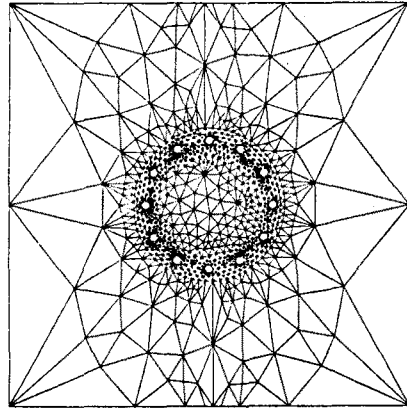


그림 6 필라멘트 12개의 경우 요소 분할도
 Fig. 6 Mesh of 12-filamentary superconducting wire

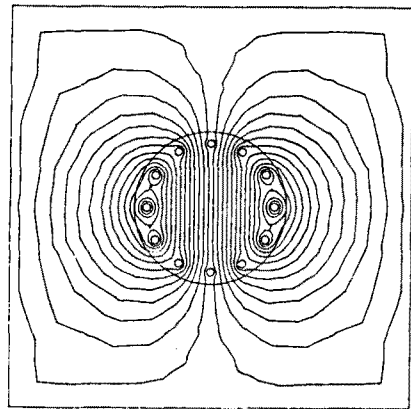


그림 7 $z=0$ 상에서의 등전위선
 Fig. 7 Equi-potential lines on $z=0$ plane

3. 해석 결과

필라멘트 12개의 경우에 대해 $z=0$ 인 경우 단위길이당 결합 손실은 105 [W/m]이고 이에 대한 기존의 결합 손실 계산식에 의한 이론적 계산치는 112 [W/m] 이다. 주기경계 내의 $z = L_p/24$ 에서의 등전위선 분포는 그림 (8)과 같다. 또한 주기경계인 $z=0$ 에서 $z=L_p/12$ 까지를 10 등분하여 각 단면에서 결합

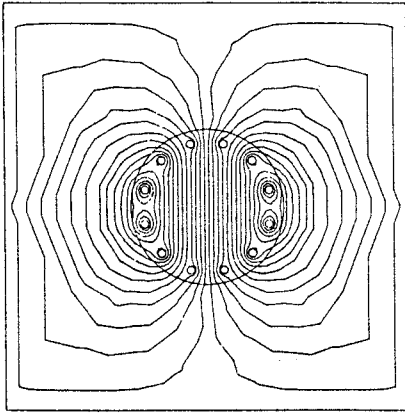
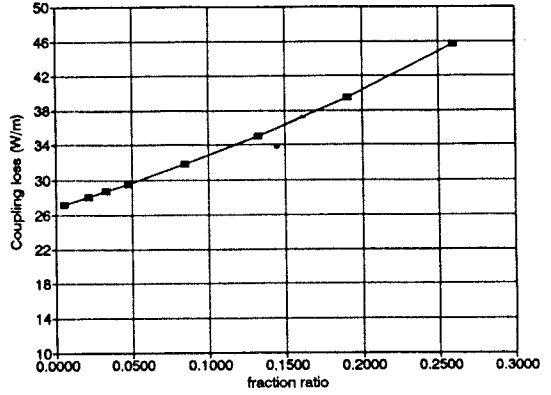
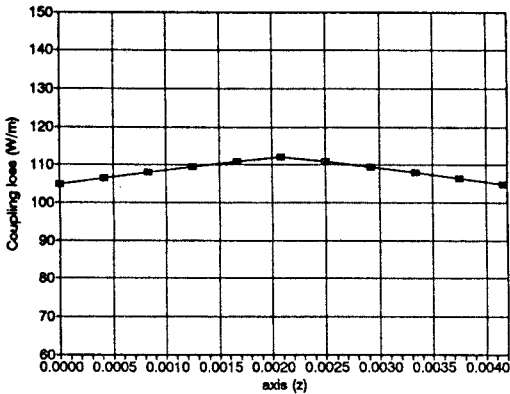


그림 8 $z=Lp/24$ 상에서의 동전위선
Fig. 8 Equip-potential lines on $z=Lp/24$ plane



$B_m = 2.5$ [T], $L_p = 0.05$ [m], $D = 0.00095$ [m]

그림 10 점적율의 변화에 대한 결합손실
Fig.10 Coupling loss of various fraction ratio



$B_m = 5$ [T], $L_p = 0.05$ [M], $D = 0.00095$ [m]
filament radius = 0.00005 [m]

그림 9 주기경계 내의 각 단면에서의 결합손실
Fig. 9 Coupling loss of one periodic boundary

손실을 구한 결과는 그림 (9)와 같다.

필라멘트의 반경을 변화시켜 초전도체인 필라멘트가 선재 단면에서 차지하는 면적비율(점적율)을 변화시킬 때 결합손실값의 변화를 그림 (10)에 보인다.

4. 결론

다심 초전도체의 경우 uniform한 외부 자계가 인가 될 때 결합 손실은 트위스트 피치 대 선재 직경의 비가 5보다 큰 경우에 대해서는 각 단면에서의 결합손실이 5% 이내의 차이를 보이므로 2차원 해석으로도 가능하며, 임의의 한 단면에 대한 손실을 해석하므로써 결합 손실의 값을 얻을 수 있다. 더 정확한 해석을 위해 실제의 선재에 가까운 많은 개수의 필라멘트가 층으로 되어 있는 경우의 해석을 행하고자 한다.

참고문헌

- [1] E. W. Collings, " APPLIED SUPERCONDUCTIVITY, Metallurgy, and Physics of Titanium Alloys", 1986, Plenum Press, New York.
- [2] W. J. Carr, " Ac loss and Macroscopic Theory of Superconductors", 1983, Gordon and Breach, Science Publishers, Inc.
- [3] Martin N. Wilson, " Superconducting Magnet", 1983, Clarendon Press Oxford.
- [4] H. Brechna, "Superconducting magnet systems", Springer-Verlag, Heidelberg, New York, 1973.
- [5] T. Nakata, N. Takahashi, K. Muramatsu, Y. Fujii, M. Kitagawa and J. Takehara, " 交流 超電導 線内の 結合 電流의 3次元 解析", 平成 2年, 電氣學會全國大會.
- [6] K. Kanbara, " Transverse field loss of superconducting wires consist of filaments with high resistive boundaries", Cryogenics, Vol. 27, September, 1987.
- [7] G. Ries, " Ac-Losses in multifilamentary superconductors at technical frequencies", IEEE Trans, Vol .MAG-13, No. 1, January, 1977
- [8] W. J. Carr, J. Appl phys, 45, 935 (1974)