

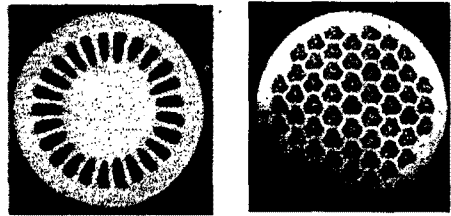
유한요소법을 이용한 고온 초전도 다심 원형선재의 결합전류분포 및 손실계산

심정욱, 차귀수, 이지광\*  
 순천향대학교 정보기술공학부, 우석대학교 전기공학과\*

Coupling Currents distribution and Losses of HTS Multi-filament round wires by using FEM

Jungwook Sim, Gueeso Cha, Jikwang Lee\*  
 Soonchunhyang University, Woosuk University\*

**Abstract** - The round HTS wire is easier to handle than the rectangular HTS tape. This paper describes the coupling losses of the round HTS wires by finite element method. Effect of filament arrangement and filament size of the round HTS wire are considered. Three types of filaments arrangement, one and double layer radial filaments and Multi-filament, are considered. Calculation results show that coupling losses of the one layer filaments round HTS wire vary only a little with the direction of external magnetic field.



(a) 방사형 필라멘트 고온초전도선  
 (b) 극세다심형 필라멘트 고온초전도선

1. 서 론

일반적으로 현재 생산되어지고 있는 BSCCO계열의 고온초전도선은 통전할 수 있는 전류가 저온초전도선에 비하여 현저히 작고, 선재화하는 데 있어서 가공성이 떨어진다. 이러한 문제들을 극복하기 위해 주로 테이프 형태로 가공하지만 외부에서 자장이 인가될 경우 자장의 방향에 따라 고온초전도선의 내부에서 발생하는 결합전류의 분포가 현저히 달라지고, 결합손실 역시 이러한 분포에 따라 많은 차이를 나타낸다. 이러한 손실은 초전도선의 임계전류의 크기를 불균일하게 하는 원인이 되고 응용기기 제작 시 고온초전도선의 배치에 큰 영향을 주게 된다.

근래에 들어서는 고온초전도선의 제작기술이 발전함에 따라 교류손실을 줄이기 위해 트위스트를 한 테이프 형태의 선재뿐만 아니라 권선을 용이하게 하고 외부자장의 방향에 따른 손실의 차이를 줄이기 위해 기존의 테이프형태가 아닌 그림 1(a)과 같은 원형선의 형태를 개발하고 있으며, 최근에는 그림 1(b)와 같은 극세 다심형 고온초전도선까지 개발되고 있다.

원형 초전도선에서는 초전도체이프와 비교하여 볼 때 필라멘트의 배치가 방사형으로 중심에 대하여 대칭적인 구조를 갖게 되므로 결합손실을 결정하는 결합전류의 분포가 달라진다. 이에 따라 본 논문에서는 초전도선재의 필라멘트 크기와 배치를 고려해서 유한 요소법을 이용하여 동일한 필라멘트 접촉을 상에서 방사형 필라멘트 구조를 갖는 초전도선의 필라멘트 배치가 1층일 경우와 2층일 경우를 나누어 계산하고 초전도선의 필라멘트의 배치가 극세 다심형으로 균일할 경우에 따른 결합전류분포와 결합손실을 계산하였다.

2. 본 론

2.1 결합손실의 계산

그림 2의 소선에서처럼 축방향을 따라서 꼬여있는 임

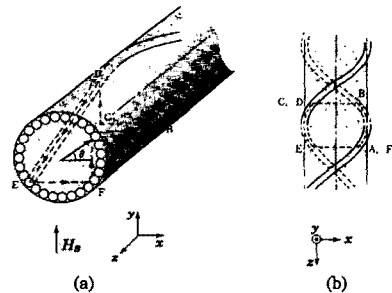


그림 2. 외부자계에 의해 필라멘트 사이에 흐르는 결합전류

의 두 필라멘트에서 외부에서 횡방향으로 시변자계가 가해지면, 선재 내의 임의의 두 필라멘트 사이에는 외부자계에 대해 반발하는 A→B→C→D→E→F→A의 방향의 전류가 형성되는 전위차가 발생한다. 초전도체로 구성된 필라멘트 내에는 전계가 존재하지 않으므로 필라멘트를 따라서는 등전위를 이루고, 그림 2(b)에서처럼 임의의 폐회로에 유기된 전위차에 의해서 상전도체인 모체 부분에 결합전류가 발생한다.

모델의 수치해석을 위해 중심에 대하여 r만큼의 거리를 갖는 대칭인 두 필라멘트에 유기되는 전위를 구하면 외부자장  $B = B_m \sin \omega t$  이고 자속이 쇄교되는 면적  $ds = r \cos \theta dz$  일 경우 다음과 같다.

$$\int \vec{E} \cdot d\vec{l} = - \frac{\partial}{\partial t} \int B_m \sin \omega t r \cos \theta dz \quad (1)$$

여기서 z방향의 변화에 대한 식으로 바꾸기 위해 식 (1)의  $\theta$ 는 다음과 같이 정의 할 수 있다.

$$\theta = \frac{2\pi}{l_p} z \quad (2)$$

여기서  $I_p$ 는 트위스트 피치이다. 식 (1)과 식 (2)로부터 전위  $V$ 는 다음과 같이 된다.

$$V = -\frac{\partial}{\partial t} \left\{ B_m r \sin \omega t \int \cos \left( \frac{2\pi}{l_p} z \right) dz \right\} \quad (3)$$

위 식을 계산하여,  $t=0$ 에서,  $x=0$ ,  $y=0$ 인 점을 기준( $V=0$ )으로 하는 임의의 필라멘트에 유기되는 전압은 다음과 같다.

$$V(r, \theta) = \frac{l_p}{2\pi} B_m \omega r \sin \theta \quad (4)$$

여기서,  $\theta$ 는 그림 2(a)에서 초전도선의  $x$ 축과 이루는 각도로 외부자장이 인가되는 방향이다.

식 (4)에 의해서 계산된 전위를 각 필라멘트의 경계 조건으로 지정하고 유한요소법을 이용해서 초전도선의 모재에 발생하는 전계와 결합전류를 계산한다. 이 결합전류에 의해서 모재에서 발생하는 단위길이 당의 결합손실은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$P = 2f \int_0^{1/2l} \frac{E^2}{\rho} dz dt \quad (5)$$

위 식에서  $\rho$ 는 모재의 저항률이다.

## 2.2 해석모델

수치해석을 하기 위해 사용한 모델은 그림 1의 초전도선들을 그림 3의 형태로 단순화하여 결정하였다. 그림 3(a)는 단층형 필라멘트 구조를 가지는 모델로 고온초전도 필라멘트를 중심에 대해 방사방향으로 배치한 구조를 가지고 있다. 그림 3(b)는 그림 3(a)와 동일한 필라멘트 점적율을 고려하여 2층으로 필라멘트를 배치한 고온초전도선이다. 그리고 그림 3(c)도 같은 점적율과 반경을 고려하여 초전도선에 일정하게 필라멘트를 분포시킨 모델이다.

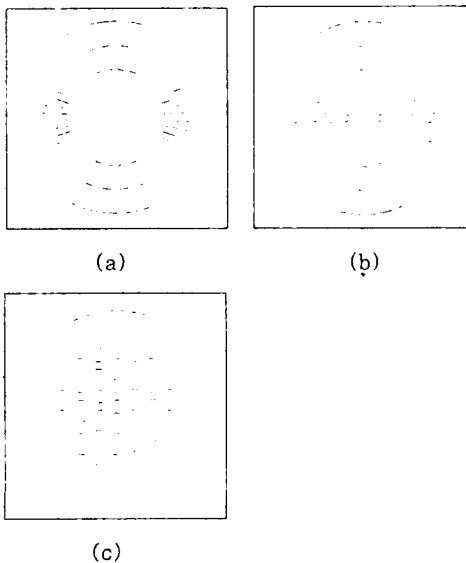


그림 3. 수치해석에 사용된 고온초전도선 모델  
(a) 모델 1 (b) 모델 2 (c) 모델 3

표 1. 고온초전도선재의 사양

	model 1	model 2	model 3
선재의 재질	BSCCO2223		
선재의 지름	$1.38 \times 10^{-3} \text{m}$		
선재의 단면적	$1.5 \times 10^{-6} \text{m}^2$		
모재의 종류	Ag10%Au		
모재의 저항률	$\rho = 2.1 \times 10^{-8} \Omega \text{m}$ at 77K		
필라멘트의 수	22개	22개	31개

수치해석기법으로는 유한요소법을 이용하여 계산하였고, 표 1은 수치해석에 사용된 적층형과 방사형 필라멘트 초전도선의 사양이다. 여기서 선재의 재질은 BSCCO 2223이고 선재의 지름은  $1.38 \times 10^{-3} \text{m}$ 이며 고온 초전도선의 모재로는 Ag10%Au를 사용하였다

## 3. 해석결과

외부 자장이 인가되면 그림 2에 표시된 대로 필라멘트가 만드는 페루프를 따라서 결합전류가 흐르고 이 전류에 의해서 결합손실이 발생한다. 그림 3의 모델 1과 모델 2의 방사형 필라멘트 초전도선은 필라멘트가 중심에 대해 방사방향으로 일정한 배치를 가진 것으로 대칭적인 구조를 가지고 있다. 또한 모델 3은 극세다심형 필라멘트 구조를 가지는 초전도선이다. 모델 3에서는 매우 가는 각각의 필라멘트를 표현하는데 무리가 있으므로 각 극세 필라멘트군을 하나의 필라멘트로 표현하여 해석하였다. 또한 각 초전도선에서 필라멘트가 차지하는 점적율을 동일하게 하여 결합전류분포와 손실을 계산 비교하였다.

그림 4는  $y$ 축 방향으로 20mT의 외부자계가 인가될 경우에 방사형 필라멘트의 배치가 1층으로 되어있는 초전도선의 등전위선 분포와 결합전류분포이다. 여기서 초전도선의 트위스트피치는 6mm이다. 그림 5는 동일한 조건에서 방사형 필라멘트의 배치가 2층으로 되어있는

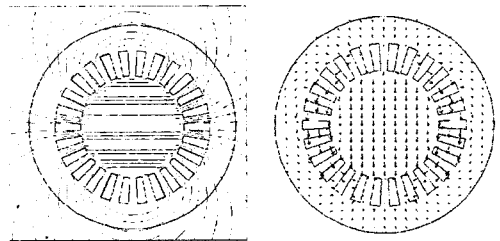


그림 4. 모델1의 등전위선 분포와 결합전류분포

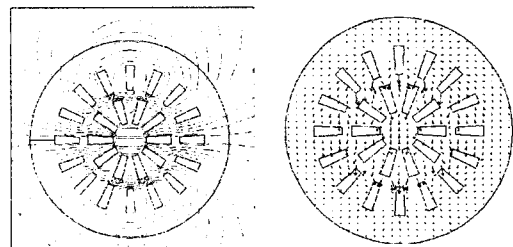


그림 5 모델 2의 등전위선 분포와 결합전류분포

초전도선의 등전위선 분포와 결합전류분포이다. 여기서 보면 각 초전도선의 결합 전류 분포는 외부자장에 대해 반발하는 방향으로 분포되어있고 따라서 등전위선은 외부자장과 수직인 형태로 분포되어 있음을 알 수 있다.

두 모델의 결합손실을 계산해 보면 모델 1의 결합손실은 1.69(mW/m)이고 모델 2의 결합손실은 2.09 (mW/m) 그리고 모델 3의 결합손실은 1.83(mW/m)로 동일한 점적울에서 1층인 구조와 2층인 구조일 때 그리고 극세다심형일 경우에도 손실의 크기가 달라짐을 알 수 있다. 이는 손실을 결정해주는 결합전류의 분포가 필라멘트의 배치에 따라 다르기 때문으로 모델 1의 결합전류분포를 보면 필라멘트가 없는 중심부분에는 결합전류 및 등전위선 분포가 균등하게 분포되어있고 방사형으로 배치되어있는 필라멘트 부분은 필라멘트와 필라멘트의 사이로 중심에 비해 큰 결합전류가 흐르고 있음을 알 수 있다.

특히 외부자장의 방향에 대해 동일한 방향에 대한 필라멘트 간의 간격이 좁을 경우의 결합전류 크기가 크다. 이것은 외부자장에 대해 반발하는 결합전류를 만들기 위해 생기는 전위차가 필라멘트 사이의 간격이 작은 부분에 생기는 경우로 그 간격이 작을수록 결합전류의 크기가 커짐을 알 수 있다. 모델 1의 경우 결합전류의 크기가 큰 곳은 초전도선의 중심에 대해 x축 상에 접하고 있는 필라멘트 부분에 집중되어있다.

모델 2의 경우에는 이러한 결합 전류 분포가 모델 1의 경우처럼 중심부분에 균등하게 분포되어있는 것이 아니라 중심에도 필라멘트가 배치되어 있고 그 간격이 작음으로 말미암아 필라멘트 사이에 발생하는 전위차에 의한 결합전류의 집중이 모델 1에 비해 많은 곳에서 발생되기 때문이다. 또한 그림 6을 보면 필라멘트의 간격이 좁은 부분에 등전위선이 밀집되어있고 결합전류의 크기가 큼을 볼 수 있다. 이것은 필라멘트가 중심부분에 밀집되어 있는 경우로서 이 역시 필라멘트 간격이 작은 부분이 많음으로 생기는 결과로 보여진다.

그림 7은 외부자계의 크기에 따른 각 모델의 손실 비교로서 동일한 점적울을 놓고 볼 때 모델 1과 같은 1층으로 구성된 방사형 필라멘트 초전도선의 결합전류가 가장 작음을 알 수 있다.

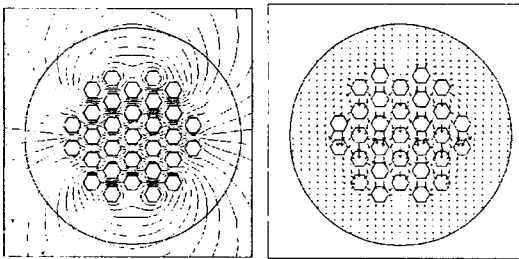


그림 6. 모델 3의 등전위선 분포와 결합전류분포

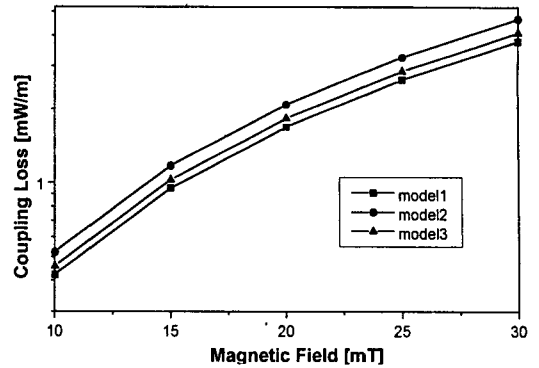


그림 7 외부 자계의 크기에 따른 각 모델의 손실비교

### 3. 결 론

현재 고온초전도선의 개발은 다양한 형태로 진행되고 있다. 본 논문에서는 현재 개발이 진행되고 있는 원형형태의 선재 중 방사형 필라멘트 구조의 고온초전도선과 극세다심형 고온초전도선의 결합전류분포와 손실을 수치해석기법을 적용하여 계산하였다.

동일한 필라멘트 점적울을 가지는 방사형 필라멘트 고온초전도선의 1층 구조와 2층 구조의 선재, 그리고 극세다심형 고온초전도선을 비교해 볼 때 외부자계의 방향과 동일한 부분에 대한 필라멘트의 간격이 작은 부분이 많을수록 손실의 크기가 커짐을 알 수 있었다. 따라서 고온초전도선의 결합손실을 줄이기 위해선 자기자계 손실 등을 고려하여 필라멘트간격이 작은 부분이 많지 않은 설계를 해야할 것으로 보여진다.

### [참 고 문 헌]

- [1] A. M. Campbell, "AC Losses in High Tc Superconductor," IEEE Trans. on AS, Vol. 5, No.2, pp.682-687, 1995
- [2] 심정욱 등, "해석적인 방법과 수치적인 방법에 의한 고온 초전도체이프의 결합손실 계산," 전기학회 논문지, 48B 권, 6호, pp.309-315, 1999
- [3] M. P. Oomen, J. Rieger, M. Leghissa and B. Fischer, "Magnetic AC Loss in Twisted-Filament Bi-2223 Tapes," IEEE Trans. on AS, Vol.9, No.2, pp.821-824, 1999
- [4] W. Goldacker, H. Eckelmann, M. Quilitz, and B. Ullmann, "Effect of Twisting on the Multi-filament BSCCO(2223)/Ag and /AgMg Tapes," IEEE Trans. on AS, Vol.7, No.2, pp.1670-1673, 1997
- [5] F. Darmann, et al., "AC Losses of Filamentary HTS Twisted Filament Round Wires and Flat Tapes," IEEE Trans. on AS, Vol.9, No.2, pp.789-792, 1999