

적층형 필라멘트와 방사형 필라멘트 구조를 갖는 원형 초전도선의 결합손실

Coupling Losses of the Round HTS Wires with Stacked Filaments and Radial Filaments

심정욱*, 차귀수**, 이지광***, 한송엽†

Jungwook Sim*, Gueesoo Cha**, Ji-Kwang Lee***, Song-Yop Hahn†

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. Two types of filaments arrangement, stacked filaments and radial filaments, are considered. Calculation results show that coupling losses of the round HTS wire vary only a little with the direction of external magnetic field.

Key Words: coupling loss, HTS wire, stacked filament, radial filament.

1. 서 론

현재 사용되는 다심형 고온초전도선재는 초전도체로 되어있는 필라멘트의 주위를 상전도체인 모재가 둘러싸고 있는 구조로 되어있다. 모재는 초전도선에 상전이 발생했을 때에 초전도체에 흐르는 전류를 분류해서 초전도선의 극저온 안정성을 높이는 역할을 한다. 따라서 모재는 초전도체가 아니라 상온에서의 전기저항율이 낮은 Ag등의 상전도체를 사용한다.

일반적으로 현재 생산되어지고 있는 BSCCO계열의 고온초전도선은 통전할 수 있는 전류가 저온초전도선에 비하여 현저히 작고, 선재화 하는 데에 있어서 가공성이 떨어지기 때문에 저온초전도선에 비해 소선의 직경이 크고 내부의 필라멘트의 수가 적고 임계전류를 증대시키기 위해 선재를 주로 테이프형태로 제작한다. 그러나 이러한 형태로 가공하다보니 외부에서 자장이 인가될 경우 자장의 방향에 따라 고온초전도선의 내부에서 발생하는 교류손실이 큰 차이가 발생하게 되었고, 이러한 손실은 초전도선의 임계전류의 크기를 불균일하게 하는 원인이 되고 응용기기 제작 시 고온초전도선의 배치에 큰 영향을 받는다. [1],[2],[3]

근래에 들어서는 고온초전도선의 제작기술이 발전함에 따라서 다심선의 형태로 비교적 특성이 우수한 초전도선을 제작하는 것이 가능해졌을 뿐 아니라 교류손실을 줄이기 위해서 필라멘트를 트위스트하는 수준에

* 정 회 원 : 순천향대 대학원 전기공학과 박사과정

** 정 회 원 : 순천향대 공대 정보기술공학부 교수

*** 정 회 원 : 우석대 공대 전기공학과 교수

† 정 회 원 : 서울대 공대 전기공학부 교수

원고접수 : 2000년 04월 18일

심사완료 : 2000년 05월 17일

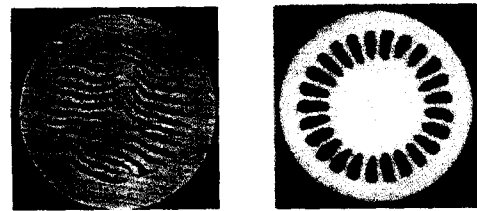


그림 1. (a) 적층형 필라멘트 고온초전도선
(b) 방사형 필라멘트 고온초전도선

Fig. 1 (a) stacked filament HTS wire
(b) radial filament HTS wire

이르렀고, 권선을 용이하게 하고 외부자장의 방향에 따른 손실의 차이를 줄이기 위해 그림 1과 같이 기존의 테이프형태가 아닌 원형선의 형태로까지 개발하게 되었다. [4],[5] 원형 초전도선에서는 필라멘트의 배치가 초전도체이프와는 달라지게 되므로 결합손실을 결정하는 결합전류의 분포가 달라진다. 이에 따라 본 연구에서는 초전도선재의 필라멘트 크기와 배치를 고려해서 결합손실을 계산한다.

2. 결합 손실 계산

그림 2의 소선에서처럼 축방향을 따라서 꼬여있는 임의의 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 의해 상전도체인 모재 부분에 결합전류가 발생한다.

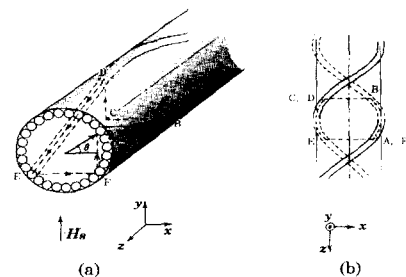


그림 2. 외부자계에 의해 필라멘트 사이에 흐르는 결합전류

Fig 2. Coupling current by the external magnetic field

모델의 수치해석을 위해 중심에 대하여 r 만큼의 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 z 방향의 변화에 대한 식으로 바꾸기 위해 식 (1)의 θ 는 다음과 같이 정의 할 수 있다.

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

여기서 l_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, θ 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.

$$P = 2f \frac{A}{l_p} \int_0^{1/2f} \int_0^{1/4} \frac{E^2}{\rho} dz dt \quad (5)$$

위 식에서 ρ 는 모재의 저항율이다. 실제 손실계산에서는 z 축 방향을 따라서 적분하는 대신 적층형 모델의 $l_p/4$ 를 10등분하여 각 단면에서의 손실을 계산하고 이들을 이용해서 손실을 계산한다.

3. 해석모델

수치해석을 하기 위해 사용한 모델은 그림 1의 초전도선을 그림 3의 형태로 단순화하여 해석을 하였고, 수치해석기법으로는 유한요소법을 이용하여 계산하였다. 그림 4는 각 모델의 요소분할도의 일부이고 표 1은 수치해석에 사용된 적층형과 방사형 필라멘트 초전도선의 사양이다. 여기서 선재의 재질은 BSCCO 2223이고 선재의 지름은 1.38×10^{-3} m이며 고온 초전도선의 모재로는 Ag10%Au를 사용하였다.

4. 해석결과

외부 자장이 인가되면 그림 2에 표시된 대로 필라멘트가 만드는 폐루프를 따라서 결합전류가 흐르

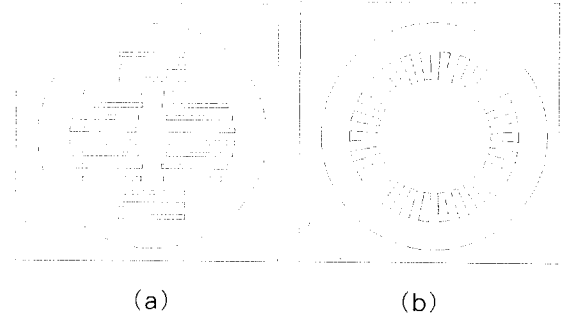


그림 3. (a) 적층형 필라멘트 고온초전도선 모델
(b) 방사형 필라멘트 고온초전도선 모델

Fig. 3. (a) stacked filament HTS wire
(b) radial filament HTS wire

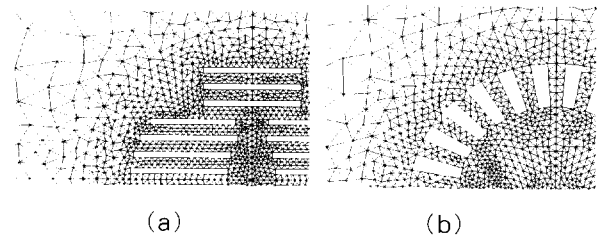


그림 4. 모델의 요소 분할도

(a) 적층형 필라멘트 초전도선
(b) 방사형 필라멘트 초전도선

Fig. 4. Mesh generation of the models
(a) The stacked filament HTS wire
(b) The radial filament HTS wire

표 1. 고온초전도선재의 사양

Table 1. Specifications of the HTS wires

	적층형 필라멘트 모델	방사형 필라멘트 모델
선재 재질	BSCCO2223	
선재의 지름	1.38×10^{-3} m	
선재의 단면적	1.5×10^{-6} m ²	
모재의 종류	Ag10%Au	
모재의 저항율	$\rho = 2.1 \times 10^{-8}$ Ωm at 77K	
필라멘트의 수	22개	26개

고 이 전류에 의해서 결합손실이 발생한다. 그림 3(a)의 두 개의 적층형 필라멘트 층을 가지는 고온 초전도선은 외관상으로는 원형의 선재형태를 지니지만 내부의 필라멘트 배치는 기존의 고온초전도테이프의 형태와 같게 되어있다. 이것은 선재 제작과정에서 단심 초전도테이프들을 여러 개를 모아 다심선으로 구성하게끔 만든 것이고 그림 3(b)의 방사형 필라멘트 초전도선은 필라멘트가 중심에 대해 방사 방향으로 일정한 배치를 가진 것으로 대칭적인 구조를 갖고 있음을 알 수 있다. 또한 그림 3의 두 선재는 각각의 손실을 비교하기 위해 모재 내에 초전도체가 차지하는 점적률을 동일하게 적용하였다.

4.1 적층형 필라멘트 고온초전도선

적층형 필라멘트 초전도선 모델에 대한 수치해석으로는 $B_m = 10 \sim 40\text{mT}$ 까지 10mT 씩의 변화에 대해 외부자장 방향이 수평방향(0°)이 되는 임의의 단면부터 수직방향($l_p/4$)이 되는 단면까지 10등분하여 각각 $l_p/40$ 씩 변화를 주면서 각 면에서 발생하는 손실을 해석을 하였고, 수직방향과 수평방향에 대해 트위스트피치의 변화를 주면서도 해석을 하였다. 이것은 적층형 필라멘트 고온초전도선이 트위스트되어 있을 경우 필라멘트의 배치가 중심에 대해 방사방향으로 대칭인 구조가 아니기 때문에 z 축 방향을 따라서 각 단면에 대해 필라멘트의 배열이 그림 5와 같은 형상으로 달라지게 된다. 그림 5는 적층형 필라멘트 초전도선의 $l_p/4$ 만큼의 길이에 따라 $l_p/12$ 씩 위치에 따른 단면 형상을 보여준다. 그림에서 보듯이 이 경우 각각의 단면에 대해 계산해보면 필라멘트 배치가 달라서 각각 다른 손실값을 가지게 된다. 따라서 수치해석에서 전체 손실을 구하기 위해 각 단면마다의 손실을 계산하여 전체를 적분하는 방법을 취하였다.

그림 6과 그림 7은 외부자장을 $B_m = 20\text{mT}$, 트위스트피치 l_p 를 6mm 로 주고 초전도선의 $l_p/4$ 만큼의 길이에 대해 $l_p/12$ 씩 떨어진 위치의 각 단면을 상대적으로 외부자장의 방향이 수평방향이 되는 0° (0)부터 수직방향이 되는 90° ($l_p/4$)까지 30° ($l_p/12$)씩 변화된다고 보고 각각의 단면에서의 등전위 분포와 결합전류분포를 그렸다. 그림 6에서 보면 등전위 분포가 외부자장의 방향에 대해 수직인 형태를 갖는 것을 볼 수 있고 위치에 따라 등전위선이 필라멘트의 형상을 따라 집중적으로 분포되는 변화를 볼 수 있고, 특히 수평방향(0°)의 외부자장에 대해 내부의 두 필라멘트 층 사이에 등전위선이 밀집되어 있음을 볼 수 있다. 그림 7의 결합전류분포를 보면 외부자장에 대해 동일한 방향을 갖는 결합전류분포를 볼 수 있다. 이러한 것들은 자속의 방향에 따라 초전도선 내부의 자속밀도 분포가 초전도 필라멘트의 모양이나 배치 그리고 외부자장의 방향에 따라 변하고 있음을 뜻하는 것으로 자속이 집중하는 부분이 변화함에 따라 특정부위에 집중하게 되면 임계 전류 감소 등으로 퀸치발생의 원인이 될 수 있다.

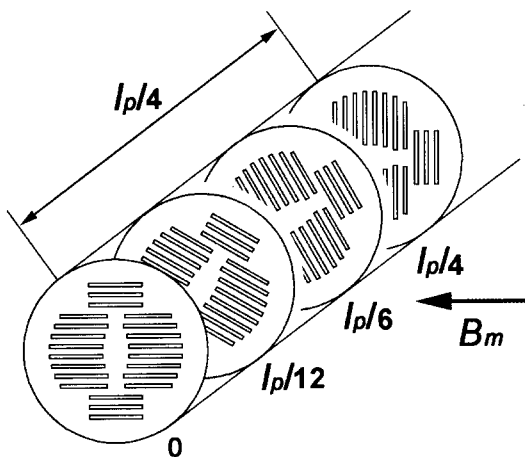


그림 5. $l_p/4$ 에서 각 단면에 따른 트위스트된 필라멘트의 배치
 Fig. 5. Disposition of the twisted filament by each cross section at $l_p/4$

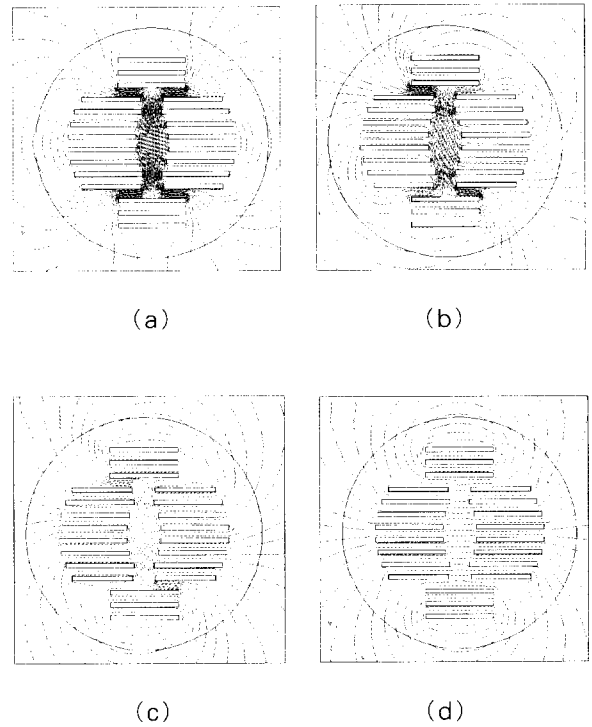


그림 6. 외부자장에 따른 적층형 필라멘트 초전도선의 등전위분포 (a) 0° (b) 30° (c) 60° (d) 90°
 Fig. 6. Equi-potential line of stacked filament HTS wire by external fields (a) 0° (b) 30° (c) 60° (d) 90°

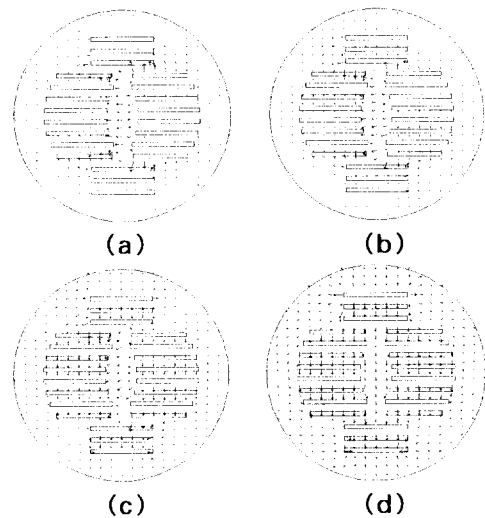


그림 7. 외부자장에 따른 적층형 필라멘트 초전도선의 결합전류분포 (a) 0° (b) 30° (c) 60° (d) 90°
 Fig. 7. Coupling current of stacked filament HTS wire by external fields(a) 0° (b) 30° (c) 60° (d) 90°

적층형 필라멘트 고온초전도선의 결합손실은 기존의 테이프형 선재와 마찬가지로 외부자계의 방향에 따라 결합 손실의 크기가 달라진다. 위에서 언급한 바와 같이 임의의 단면에 대해 외부인가자장의 방향이 x 축 방향일 경우를 수평방향($\theta = 0^\circ$), y 축 방향일 경우를 수직방향($\theta = 90^\circ$) 외부자장이라고

보고, 이 경우 각 방향의 손실을 계산하면 수평방향일 경우 2.72(mW/m)이고 수직방향일 경우는 1.84(mW/m)로 수직방향일 때의 손실이 더 크다. 이는 수직방향의 자장이 인가되는 경우의 손실이 수평방향의 자장이 인가되는 경우의 손실에 비해서 훨씬 큰 테이프형 고온초전도선의 경우와는 반대의 결과이다. 적층형 고온초전도선에서는 수평방향의 외부자계가 인가될 때에 결합전류가 흐르는 페루프의 면적이 가장 커지기 때문에 결합전류도 가장 많이 흐르고 이에 따라 결합손실도 가장 크게 된다. 이와는 반대로 수직방향의 외부자계가 인가될 때에는 페루프의 면적이 가장 작아지고 결합손실도 가장 적게 된다. 테이프형 고온초전도선에서는 수직방향의 자계가 인가될 때의 페루프 면적이 수평방향의 자계가 인가될 때의 페루프 면적에 배해서 훨씬 크다.

그러나 임의의 단면에 대해서 해석할 경우 필라멘트의 배치나 형태가 일정한 대칭형으로 되어있으면 초전도선의 어느 단면에서나 필라멘트의 배치가 일정해 보이지만 적층형 필라멘트 초전도선과 같이 필라멘트의 배치가 불균일할 경우 그림 5와 같이 임의의 단면에 대해 인가되는 외부자장의 방향이 달라지게 되고 따라서 정확한 해석을 위해 한 피치에 대해 각 부분마다의 손실에 대해 식 (5)를 이용하여 계산하였다. 따라서 이 경우 초전도선에서 발생하는 결합손실은 2.28(mW/m)가 된다.

그림 8은 적층형 모델의 $l_p/4$ 를 10등분하여 각 지점에서의 손실의 변화를 나타낸 그림이다. 그림 8에서 보듯이 수평방향 외부자계에 대해 채교되는 면적이 가장 크게 되는 초전도필라멘트 경로를 가지므로 손실이 가장 크게 나타나고 수직방향으로 갈수록 경로가 차지하는 면적이 작아져 손실이 감소됨을 알 수 있다. 또한 각각의 수직과 수평방향에 따른 손실비가 31%정도로 일정함을 알 수 있다.

그림 9는 적층형 필라멘트 모델에 트위스트 피치의 변화를 주면서 계산을 하였다. 여기서 보면 트위스트 피치가 클수록 손실이 증가되는 것을 알 수 있다. 또한 수평방향과 수직방향에 대한 결합손실의 차이를 알 수 있다.

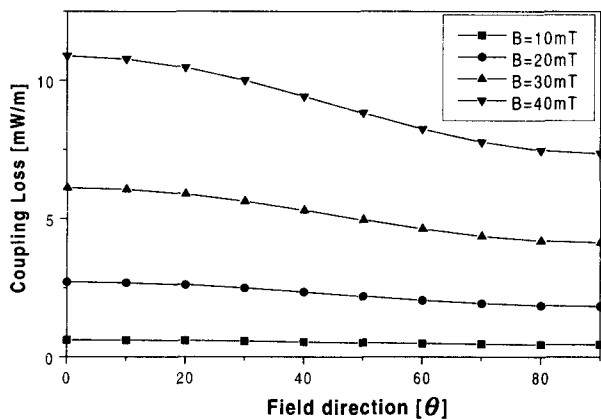


그림 8. 적층형 필라멘트 초전도선의 각 단면에 따른 결합손실의 비교

Fig. 8. Coupling loss with each cross section of stacked filament HTS wire

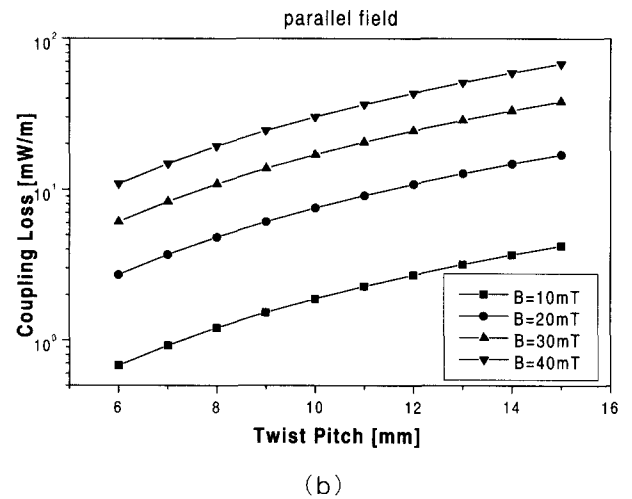
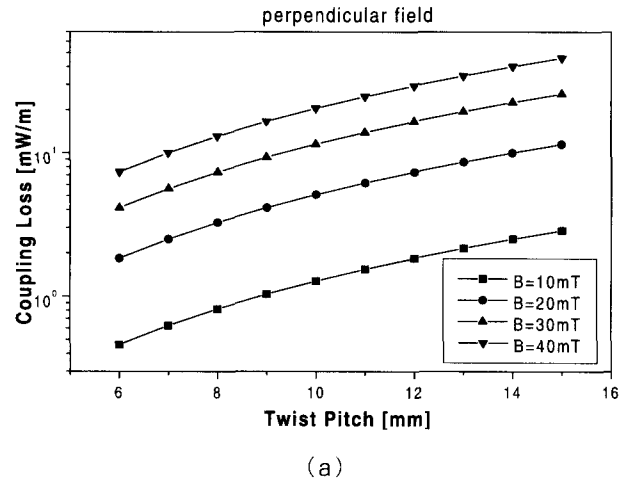


그림 9. 트위스트 피치에 따른 결합손실비교
(a)수직방향외부자계 (b)수평방향 외부자계

Fig. 9. Coupling loss by twist pitch
(a) Perpendicular magnetic field
(b) Parallel magnetic field

4.2 방사형 필라멘트 고온초전도선

그림 10과 그림 11은 그림 3(b)의 방사형 필라멘트 초전도선 모델에 적층형 필라멘트 모델과 동일한 조건으로 $B_m=20mT$, $l_p=6mm$ 일 경우에 대하여 수평방향과 수직방향의 외부자장에 대한 등전위분포와 결합전류분포이다. 그림을 보면 외부자장이 수평방향이나 수직방향으로 인가되더라도 초전도선의 필라멘트 배치가 중심에 대해 대칭인 구조를 가짐으로 모재 내의 등전위 분포와 결합전류 분포가 일정하고 균일함을 알 수 있다. 따라서 적층형 필라멘트 초전도선과는 달리 임의의 방향의 외부자계에 대해서 결합손실의 크기가 같음을 알 수 있다. 이때 계산결과는 수평방향($\theta=0^\circ$)일 경우와 수직방향($\theta=90^\circ$)일 경우의 결합손실은 1.69(mW/m)로 동일함을 알 수 있다. 이것은 초전도선을 응용기에 사용할 경우 외부자장의 영향에 대한 초전도선의 배치를 심각하게 고려할 필요가 없다는 것을 뜻한다. 앞으로의 고온초전도선은 이러한 형태로 발전해 나갈 것으로 생각된다.

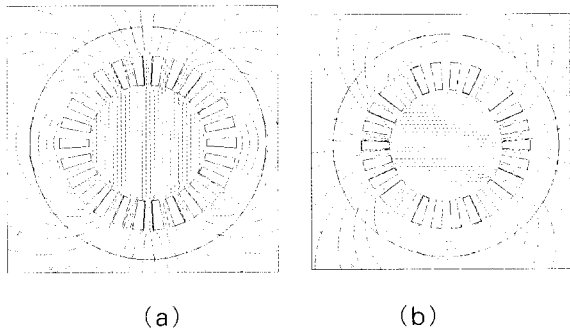


그림 10. 외부자장에 따른 방사형 필라멘트 초전도선의 등전위분포 (a)0° (b)90°

Fig. 10. Equi-potential line of radial filament HTS wire by external fields (a)0° (b)90°

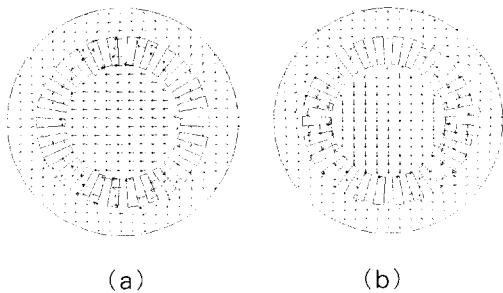


그림 11. 외부자장에 따른 방사형 필라멘트 초전도선의 결합전류분포 (a)0° (b)90°

Fig. 11. Coupling current of radial filament HTS wire by external fields (a)0° (b)90°

5. 결 론

고온초전도선은 현재 사용되고 있는 테이프의 형태 외에 원형의 형태로의 개발이 진행되고 있다. 본 논문에서는 현재 개발이 진행되고 있는 원형 선재형태의 두 초전도선의 결합손실을 해석하여 비교해 보았다. 적층형 필라멘트 초전도선의 경우 필라멘트 형태가 트 위스트 됨에 따라 필라멘트 사이에 자속이 집중되는 부분이 많은 것을 볼 수 있고 그곳이 많은 결합전류가 집중됨을 알 수 있다. 그에 비해 방사형 필라멘트 초전도선의 경우는 대칭적인 구조와 일정한 간격으로 자속이 집중되는 부분이 적층형에 비해 적음을 알 수 있다. 따라서 손실계산 결과 동일한 점적율을 가지는 두 초전도선들 중에 방사형 필라멘트 초전도선의 손실이 적음을 알 수 있다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부의 지원에 의해 수행되었습니다.

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 고온초전도테이프의 결합손실 계산." 전기학회 논문지, 48B권, 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 Multifilament 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

저 자 소 개

심정욱(沈政燾)



1970년 10월 19일생. 1996년 순천향대 공대 전기공학과 졸업, 1998년 동대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동대학원 전기공학과 박사과정

차귀수(車貴守)



1956년 7월 18일생. 1978년 서울대 공대 공업교육학과 졸업. 1987년 동대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1987년 순천향대 조교수. 1991년 영국 Bath대학 방문교수. 현재 순천향대 공대 정보기술공학부 교수

이지광(李志光)



1966년 6월 1일생. 1989년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1992년 동대학원 전기공학과 졸업(석사). 1997년 동대학원 전기공학과 졸업(공학박). 현재 우석대 전기공학과 전임강사

한송엽(韓松曄)



1939년 3월 14일생. 1963년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1968년 서울대 전기공학과 전임강사. 1979년 프랑스 로렌공과대학 대학원 졸업(공학박) 1995년 전기학회 회장. 1995년~1996년 서울대 공과대학 학장. 현재 당학회 회장.