

수치해석을 이용한 적층 배열에 따른 BSCCO 적층선재의 자화손실 특성

박명진*, 이광연*, 차귀수*, 이지광**
*순천향대학교, **우석대학교

Characteristics of Magnetization Loss in BSCCO Multi-stacked Conductor According to Stacking Geometry using 2-D FEM

Myungjin Park*, Kwangyoung Lee*, Gueesoo Cha* and Jikwang Lee**
*Soonchunhyang University, **Woosuk University

Abstract - 변압기, 케이블, 한류기와 같은 고온초전도 선재의 전력기기의 개발과 응용에 있어서 교류손실은 기기의 운용과 효율에 밀접한 관계가 있기 때문에 중요한 연구 분야가 되고 있다. 또한 현재 전력기기에 응용하고 있는 고온초전도 선재는 전력기기에 필요한 통전용량을 수용할 수 없기 때문에 이를 해결하기 위한 방법으로 선재를 적층하여 통전용량을 증대시키는 다양한 방법이 연구되고 있다.

본 논문에서는 고온초전도 선재의 적층배열을 달리 하였을 때, 외부자계에 의한 고온초전도 선재의 자화손실 특성에 대해서 연구하였다. 선재의 적층 배열의 형상은 Edge-to-Edge, Face-to-Face형과 Matrix형이며, 적층 배열에 사용한 선재의 개수는 2, 4, 8개이다.

연구결과, 동일한 적층 수의 조건하에서 Face-to-Face 형의 적층배열이 다른 종류의 배열보다 자화손실이 낮음을 확인하였고, 이는 Face-to-Face 형태로 적층 될 때 인접선재로 인한 자기차폐효과가 다른 배열의 경우보다 우수하기 때문으로 보인다.

1. 서 론

130A급의 높은 임계전류를 갖는 BSCCO 계열의 고온초전도선재는 현재 초전도 변압기, 초전도케이블, 초전도 한류기 등의 차세대 전력기기의 개발이 활발히 진행 중이다.[1] 또한 이에 응용하기 위해 선재의 전기적 특성에 관한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 대용량의 고전압 변압기와 같은 전력기기에 고온초전도 선재를 응용하는 경우에 있어서는 전력기기에 필요한 높은 통전용량을 단일선재로서는 감당할 수 없기 때문에 이를 해결하기 위한 방법으로 고온초전도 선재를 여러 가닥 적층하여 전력기기에 필요한 통전용량을 만족시키는 방법이 연구 중에 있다.

고온초전도선재는 교류조건하에서 사용할 경우 초전도체의 반자기적현상으로 인해 필연적으로 교류손실을 동반하게 된다. 이러한 교류손실은 기기의 효율을 감소시키는 중요한 요소이며, 그 원인은 선재에 가해지는 교류자장의 세기와 방향에 있다. 따라서 전력기기에 응용하기 위한 고온초전도선재의 적층할 경우, 선재의 배열 방법에 따라 선재에 가해지는 교류자장의 세기와 방향이 개선되거나 혹은 악화될 수 있기 때문에 적층 선재의 임계전류를 향상 시키면서, 교류손실을 감소시키기 위한 연구는 전력기기의 개발과 그 효율을 향상시키기 위해 필연적으로 수행되어야할 연구 분야라 할 수 있다.

본 논문에서는 그림 1에서 나타난 것과 같이 초전도선재 옆으로 나란히 배열한 (a)Edge-to-Edge 형, 수직으로 배열한 (b)Face-to-Face 형, Edge-to-Edge 형과 Face-to-Face 형을 병행한 (c)Matrix 형을 구조로 하여 적층배열에 대해 교류손실의 주된 원인인 수직방향의 외부자장에 대한 자화손실을 2-D FEM을 통한 수치해석을 통해 그 크기를 비교 분석하였다.

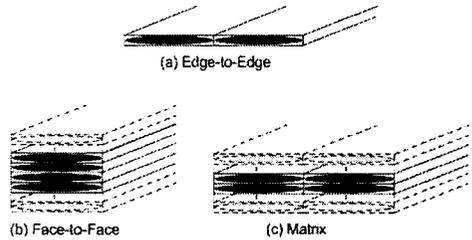


그림 1. 고온초전도 선재의 적층 배열

2. 고온초전도 선재의 수치해석

2.1 자화손실의 해석적 방법과 수치해석 기법

일반적으로 널리 알려진 수직방향 외부자계에 의한 고온초전도 선재의 자화손실은 그림 2의 (a)와 같이 두께가 매우 얇은 strip 형상에 대해서 Brandt가 제시한 방법으로 식(1)과 같이 계산할 수 있다.[2] 그러나 식(1)은 두께가 1 μm 정도로 매우 얇고, 그 형상이 strip인 YBCO coated conductor에는 적합하나, 그림 2(b)의 BSCCO 선재와 같이 YBCO coated conductor에 비해 상대적으로 두께가 매우 크고 초전도 필라멘트들이 이루는 형상이 타원형인 경우에는 적합하지 못하다. 따라서 본 논문에서는 식(2)를 이용하여 타원형 선재의 수직방향 자화손실을 계산하였으며 이를 수치해석의 결과와 비교하였다.

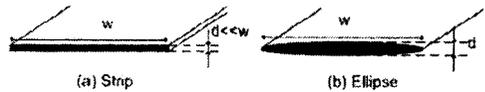


그림 2. Strip 모형과 Ellipse 모형.

$$Q_m = \frac{2B_a^2}{\mu_0} \frac{\pi w}{2\beta d} \left(\frac{2}{\beta} \ln(\cosh \beta) - \tanh \beta \right) \quad (1)$$

여기서 B_a 는 교류인가자장의 피크치 값을 나타내며,

$$\beta = \frac{B_a}{B_d}, \quad B_d = \mu_0 J_c d / \pi \text{이다.}$$

$$Q_m(B) = M_p B_p(a) q(b) \quad (2)$$

여기서 a 는 타원형 모델의 단축길이에 대한 장축길이의 비를 나타내며, $b = \frac{B_m}{B_p(a)}$ 이다. M_p , $B_p(a)$, $q(b)$ 는 각각 아래와 같이 나타낼 수 있다.[3]

$$M_p = \frac{2}{3\pi} J_c d \quad (2a)$$

$$B_p(a) = \frac{a}{2\sqrt{1-a^2}} \ln\left(\frac{1+\sqrt{1-a^2}}{1-\sqrt{1-a^2}}\right) B_{p,c} \quad (2b)$$

$$q(b) = 4 \left[\frac{2}{1-m_0} ((1-b)^{(1-m_0)} - 1) + b(1-b)^{-m_0} + 1 \right] \quad (2c)$$

(for $0 \leq b < 1$)

$$q(b) = 4 \left[b - \frac{2}{(1-m_0)} \right], \quad (for \ b \geq 1) \quad (2d)$$

여기서 식(2b)의 $B_{p,c} = \frac{\mu_0 J_c d}{\pi}$ 는 원형 도체의 완전 침투자장을 나타내며, d 는 원형도체의 직경이다.

고온초전도 선재의 자화손실을 수치해석하기 위해서는 먼저 고온초전도 선재의 전류밀도의 분포를 결정해야만 한다. 본 논문에서는 Bean의 임계상태 모델(Critical state model)을 이용하여 적층배열에 따른 고온초전도 적층선재의 자화손실을 계산하였다.

일반적으로 맥스웰 방정식으로부터 전자기장의 식은 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\vec{E}_z = -\frac{\partial A_z}{\partial t} - \nabla \phi \quad (3)$$

고온초전도선재 내부에서의 차폐전류밀도 \vec{J}_{sc} 는 식 (4)와 (5) 같이 초전도 해석영역에서 전계의 발생 유무와 방향에 의해 차폐전류밀도의 방향이 결정되며, 크기는 임계상태 모델에 의해 결정된다.

$$\vec{J}_{sc} = J_c \frac{\vec{E}}{|E|}, \quad \text{if } |E| \neq 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial \vec{J}_{sc}}{\partial t} = 0, \quad \text{if } |E| = 0 \quad (5)$$

여기서 J_c 는 초전도선재의 임계전류밀도 (A/m^2), E 는 전계 (V/m)를 나타낸다.

고온초전도 선재의 자화손실 Q_m 은 식 (3)로부터 계산된 전계 \vec{E} 와 식(4)와 (5)로부터 계산된 차폐전류밀도 \vec{J}_{sc} 의 내적으로써 단위주기와 단위체적에 대한 것으로써 아래의 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q_m = \int_0^T \int_v \vec{J}_{sc} \cdot \vec{E} \, dv \, dt \quad (4)$$

그림 3은 초전도선재의 자화손실 수치해석을 위한 전계 해석 모형을 나타낸 것이다. 초전도 선재는 폭 4mm, 두께 0.2mm, 임계전류밀도 J_c 는 액체질소 온도인 77K, self-field하에서 $2.6 \times 10^8 (A/m^2)$ 이며, 해석 영역의 중앙에 위치하도록 하였다. 해석영역의 x축과 y축 방향으로 각각 Dirichlet, Neumann 경계조건을 주어 초전도 선재의 좌우에 배치된 2개의 무한 전류원으로 부터 발생한 외부자장이 초전도체의 넓은 면에 수직방향인 y축 방향으로 가해지도록 하였으며 외부인가자장의 범위는 10~100mT이다. 수치해석에 사용한 초전도선재의 배열과 적층 수에 대한 사양을 표 1에 나타내었다.

2.2 해석결과

그림 4는 교류 외부인가 자장의 피크치가 50mT일때, 초전도 선재가 단일선재, Edge-to-Edge, 4 적층 Face-to-Face, 4 적층 Matrix로 구성되었을 때의 전류밀도분포

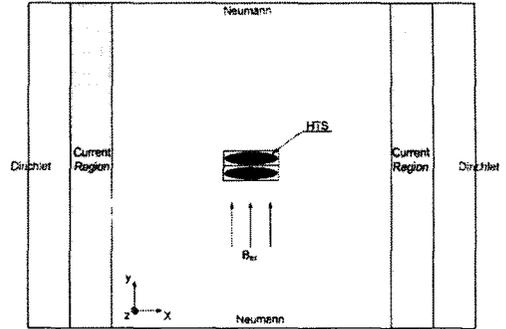


그림 3. 고온초전도 선재의 자화손실 수치해석 모델

표 1. 초전도선재의 배열과 적층 수

Stacking Geometry	Number of HTS Tape
Single	1
Edge-to-Edge	2
Face-to-Face	2, 4, 8
Matrix	4, 8

포를 나타낸 그림이다. 그림 4(a)의 단일선재인 경우 차폐전류가 선재의 중심까지 분포하여 거의 완전침투가 이루어지고 있음을 알 수 있다. 단일선재의 완전침투 자장은 식(2b)로부터 계산하였을 때 약 62mT 정도이다. 그림 4(b)는 두 개의 초전도 선재가 옆으로 나란히 배치된 Edge-to-Edge인 경우이다. 초전도 선재의 자기적 결합이 없어 전류밀도분포는 단일선재와 유사하며, 오히려 인접선재에서 발생한 자장의 영향으로 인해 오히려 전류밀도분포는 단일선재의 경우보다 좀 더 안쪽으로 침투되어 있음을 볼 수 있다. 그림 4(c)는 Face-to-Face로 초전도 선재를 4개 적층한 경우로 전류밀도의 분포는 마치 4개의 초전도 선재가 하나의 선재로 이루어진 것으로 보이고 있어 강력한 자기적 결합을 이루고 있음을 볼 수 있다. 그림 4(d)는 matrix형으로 적층된 배열이다. 행 방향 배치와 열 방향 배치로 나누어 보았을 때, 열 방향 배치는 그림4(c)와 같이 자기적 결합을 이루어 두 개의 선재가 하나의 선재처럼 보이나, 행 방향으로서는 자기적 결합을 이루지 못하고 있음을 볼 수 있다.

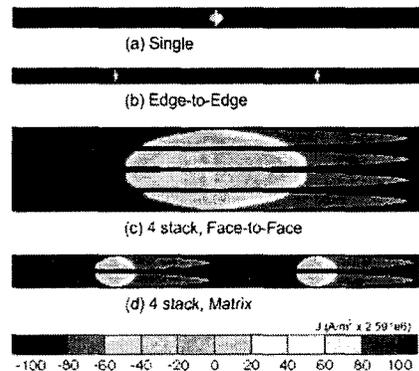


그림 4. 초전도선재의 적층배열에 따른 전류밀도분포

그림 5는 초전도 선재의 적층배열에 따른 자화손실을 1주기에 대한 단위체적당의 크기로 나타낸 것이다. 단일 선재의 경우 점선으로 표시된 식(2)을 이용한 해석식의 결과와 수치해석의 결과가 매우 잘 일치하고 있음을 보인다. Edge-to-Edge의 경우에는 인접선재의 영향으로

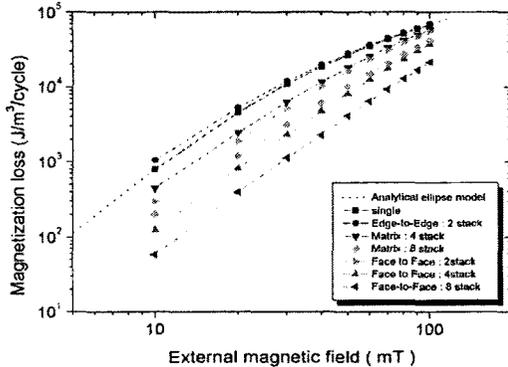


그림 5. 적층배열에 따른 적층선재의 자화손실

인해 60mT 미만에서는 단일선재의 자화손실 크기보다 크지만 60mT 이상에서는 그 영향이 점점 사라져 단일 선재와 차이를 보이지 않는다. 이러한 현상은 Face-to-Face 2 적층인 경우와 Matrix 4 적층인 경우에도 유사하게 나타나고 있음을 알 수 있다. Matrix 8 적층은 위의 경우와 달리 전체 외부자장의 범위 내에서 Face-to-Face 4 적층의 자화손실 보다 큰 것을 볼 수 있는데 이는 해석범위 내에서 자장의 완전침투가 발생하지 않았기 때문으로 볼 수 있다.

그림 6은 외부인가자장에 대해서 적층 선재의 자화손실을 단일선재의 자화손실에 대한 비로 하여 나타낸 그림이며, 이를 외부자장이 50mT, 100mT인 두 가지 경우에 대해서 표 2에 나타내었다.

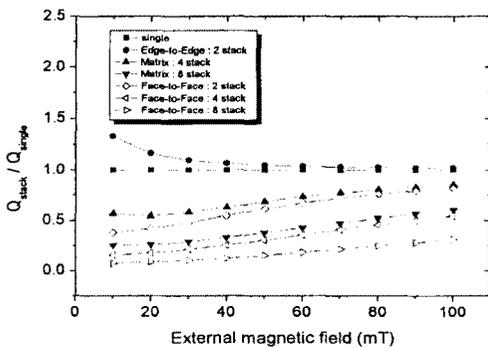


그림 6. 단일선재로 정규화한 자화손실.

표 2. 단일선재에 대한 적층선재의 자화손실 비

Stacking Geometry	No. of HTS Tape	Q_{stack}/Q_{single}	
		50mT	100mT
Single	1	1	1
Edge-to-Edge	2	1.05	1.02
Matrix	4	0.68	0.85
	8	0.38	0.60
Face-to-Face	2	0.61	0.82
	4	0.31	0.54
	8	0.15	0.31

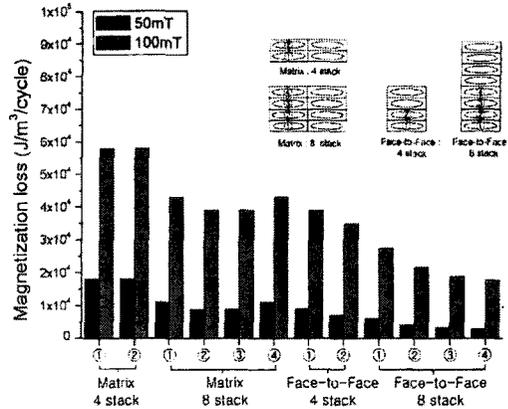


그림 7. 적층 배열의 각 위치별 자화손실.

그림 7은 Matrix 4, 8적층 과 Face-to-Face 4, 8적층 배열에 대해서 초전도 선재를 위치별로 구분하여 이에 대한 자화손실을 나타낸 것이다. 초전도 선재의 배열은 상하 혹은 좌우 대칭적으로 배열되어 있고, 자화손실의 크기가 동일함으로 전체의 1/2만을 나타내었다. Matrix 4 적층은 선재의 배치가 Matrix 8 적층의 ②, ③과 같이 내측에 위치한 선재가 없으므로 각각의 선재에서 모두 동일한 자화손실의 크기를 보였다. Matrix 8 적층의 바깥쪽에 배치된 ①, ④와 내측에 위치한 ②, ③의 자화손실은 서로 대칭을 이루고 있으며 내측에 선재의 자화손실이 작음을 확인 할 수 있다. 한쪽 열만을 보면 Matrix 8 적층은 Face-to-Face 4 적층과 동일한 배열을 이루고 있으나 자화손실의 양이 보다 커서 인접선재의 영향을 받고 있음을 알 수 있다.

3. 결 론

본 논문에서는 임계상태모델을 이용한 2-D FEM 수치해석을 통해 다 적층 고온 초전도 선재의 적층 배열에 따른 자화손실을 연구하였다. 연구결과 Edge-to-Edge 형으로 배열한 경우 단일선재에 비해 자화손실의 감소효과를 기대 할 수 없었다. 동일 개수의 선재를 이용한 경우에도 Face-to-Face 적층형태가 Matrix 배열의 적층형태보다 선재의 자기적 결합이 우수하고 이로 인한 차폐효과로 인하여 1/2이상의 자화손실 감소효과가 있어 교류손실 측면에서 매우 유리한 적층 배열임을 알 수 있다.

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 차세대 초전도응용기술개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

[참 고 문 헌]

- [1] R. Schlosser, H. Schmidt, M. Leghissa, and M. Meinert, "Development of High-temperature Superconducting Transformers for Railway Application", IEEE Transactions Applied Superconductivity, Vol. 13, No. 2, 2325-2340, June 2003.
- [2] Ernst Helmut Brandt, "Type-II-superconductor strip with current in a Perpendicular Magnetic", Physical review B, Vol. 48, No. 17, 893-906, November 1993.
- [3] Bennie ten Haken, Jan-Jaap Rabbers, Herman H.J. ten Kate, "Magnetization and AC loss in a superconductor with an elliptical cross-section and arbitrary aspect ratio", Physica C 337, 156-164, 2002.