

수치해석을 이용한 BSCCO 적층 선재들의 외부자장 변화에 따른 DC 통전 특성 계산

임형우, 강명훈, 차귀수, 이희준
순천향대학교

Calculation of DC Characteristics of Stacked BSCCO Wires under Variable External Magnetic field

Hyoungwoo Lim, Myunghun Kang, Gueesoo Cha, Heejoon Lee
Soonchunhyang University

Abstract - This paper has presented the numerical calculation of fundamental characteristics of the HTS wire by using commercial software. Numerical calculation of the HTS wire's characteristics is able to reduce the time and effort which need to be exerted to obtain those values experimentally. Results of numerical calculation, such as, critical current of the single and the multi-stacked wire under external magnetic field, were compared with that of experimental results.

1. 서 론

1986년에 임계온도가 30K을 넘는 고온초전도체를 발견한 이후 고온초전도 분야는 급속히 발전하여 현재 임계온도가 77K의 액체 질소를 냉매로 쓰이는 고온초전도 선재까지 개발되었으며, 고온초전도 선재를 사용한 기기들의 산업적 응용을 눈앞에 두고 있다.

고온초전도 선재의 응용분야로는 고온 초전도 변압기, 고온초전도 선재를 이용한 고자장 마그넷, 고온초전도 한류기, 고온초전도 송전 케이블 등을 들 수 있다. 이러한 초전도 응용기기들은 대부분 초전도 선재를 이용하고 있으며, 초전도 선재의 특성에 따라 전력기기의 용량과 특성이 달라진다. 따라서 사용하는 선재의 특성에 대하여 잘 알고 있어야 한다.

초전도 선재는 통전특성과 외부자장이 있는 경우의 통전특성이 일반전선과는 달리 비선형특성과 함께 그 값이 매우 큰 차이를 가지고 있으므로 그 특성을 알고자 할 경우 일일이 선재에 대한 특성 실험하여야 함으로 많은 시간과 비용을 투자할 수밖에 없으며, 선재마다 특성이 조금씩 다르므로 일일이 실험을 통해 확인할 수밖에 없고, 같은 선재를 이용하여 전류용량을 늘이기 위해 적층의 방법을 사용한다 하여도, 적층된 선재의 특성을 다시 실험을 통해 얻을 수밖에 없다. 이러한 이유로 많은 연구자들이 초전도 특성을 해석적 방법으로 얻으려 하고 있다.[1]

본 논문에서는 많은 시간과 비용이 들어가는 실험의 결과를 초전도 특성이 추가된 유한요소 방법으로 계산하였다. 유한요소법의 기본적 고온초전도 특성의 계산은 Kim 모델의 이론을 적용하였으며, BSCCO 선재에는 Ag층이 초전도 필라멘트의 외곽에 있으므로 Ag층의 영향도 고려하여 단일 및 적층한 선재의 DC 통전특성과 외부자장에 변화에 따른 통전특성을 계산하였다. 이렇게 해석적 방법으로 계산한 결과는 같은 조건의 선재를 제작하여 실험을 통해 그 결과를 비교 검토 하였다. 또한 단일 및 적층 선재의 고온초전도층 내부에서 보기 어려웠던 전류밀도 분포와 자속밀도 분포를 전류량에 따라 외부자장의 자속밀도 양에 따라 나타내었다.

2. 초전도선재의 수치해석

2.1 수치해석 방정식

본 논문에서는 많은 필라멘트를 갖는 BSCCO 선재를 코어 영역까지를 초전도 영역으로 가정하였으며, 통전과 외부자장의 변화에 따른 해석의 식은 다음과 같다. 다음의 식들은 초전도선재의 비선형적인 저항특성을 E-J전력법칙으로부터 얻은 것이다.[2] 식(1)은 전력 법칙이고, 식 (2)초전도체의 저항률 ρ 을 구하는 식이다.

$$E = E_c \left(\frac{J}{J_c} \right)^n \tag{1}$$

$$\rho(E, B) = \frac{E_c^{\frac{1}{n(B)}}}{J_c(B)} |E|^{\frac{n(B)-1}{n(B)}} + \rho_0 \tag{2}$$

식 (3)은 임계전류밀도, 식 (4)는 n-value를 계산하는 식이다.

$$J_c(B) = \frac{J_{c0}}{1 + \frac{B}{B_0}} \tag{3}$$

$$n(B) = \frac{n_0}{1 + \frac{B}{B_0}} \tag{4}$$

위의 식들에서 J_c 는 임계전류 밀도이고, E_c 는 임계전계 값이며, B_0 임계전류밀도가 1/2이 될때의 외부자장 값이다. 위의 변수들은 외부자장 B 와 외부온도 T 의 함수이지만 본 논문에서는 온도는 일정 하다고 가정하고 계산하였다.

본 실험에 사용한 선재의 사양은 다음의 표 1과 같으며 이는 측정을 통해 얻은 결과이다.

표 1. BSCCO 선재의 사양

종류	Bi-2223
임계전류(I_c)	124A
폭	4.2mm
초전도체 두께	0.21mm
코어영역	0.59
n-value	19.13
Ag 도전율	$2e^{-9}\Omega m$

2.1.1 해석결과

그림 1은 단일 선재의 전류량 변화에 따른 자속밀도 분포이다. 그림 1의 a), b), c)는 각각 21A, 96A, 124A의 전류가 흐를 경우 초전도체 내부 및 외부의 자속밀도 분포를 나타내고 있으며 초전도선의 양쪽 끝부분에 자속밀도가 높고 초전도선재 내부에는 자속 밀도가 낮다

그림 2는 그림 1의 경우에 대한 초전도체 내부에서의 전류밀도 분포이다. 낮은 전류일 때 외곽에 흐르던 전류가 점차 내부쪽으로 증가해 가면서 외곽부분에는 낮은 전류밀도 분포가 나타난다. 이러한 이유는 그림 1에서 나타난 것과 같이 높은 전류에서는 양쪽 끝부분에 높은 자장이 가해지므로 그에 따른 전류밀도 양이 감소하고 있는 것이다. 또한 초전도 선재는 폭이 매우 작아서 본문에서는 그림의 폭을 키웠다.

그림 3은 4적층 선재에서 전류량 변화에 따른 초전도체의 주변과 내부에서의 자속밀도 분포도이다. 단일선재와 같이 선재의 외부에 높은 자장이 가해지고 내부에는 낮은 자장이 있는 것이 잘 나타나 있다.

그림 4는 4적층 선재의 경우이며, 흐르는 전류량에 따른 전류밀도 분포이다. 전류가 높아짐에 따라 전류밀도의 분포가 점점 선재의 중앙쪽으로 이동해 가다가 임계 전류 일때는 내부 쪽에 높은 전류밀도 분포를 이루고 외곽쪽으로 낮아지는 것이 잘 나타나 있다.

그림 5는 초전도체의 넓은 면에 수직하게 외부자장이 가해진 경우이며, 0, 53mT, 100mT일 경우와 흐르는 전류가 임계전류일 때의 자속밀도 분포를 나타낸 것이다. 이러한 경우 외부에서 자속이 가해지고 초전도 선에는 전류가 흐르고 있음으로 $J \times B$ 의 로렌츠 힘에 의해 초전도체 내부에 흐르는 전류가 한쪽으로 밀리게 되며, 밀려진 전류에 의해 만들어진 자장과 외부의 자장이 더해짐으로 균일한 자장의 분포가 아닌 한쪽으로 밀려진 자장의 분포로 나타나는 것이며 그림 5의 a)는 외부자장이 없는 경우이고 b)와 c)의 경우가 이러한 경우이다.

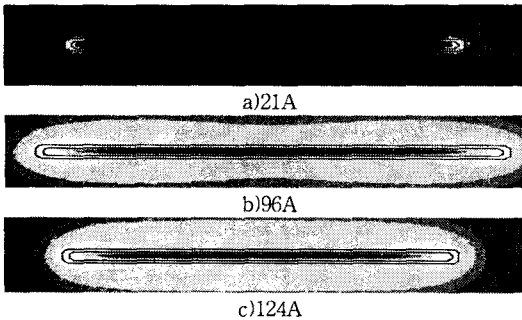


그림 1. 고온초전도 단일 선재의 자속밀도 분포

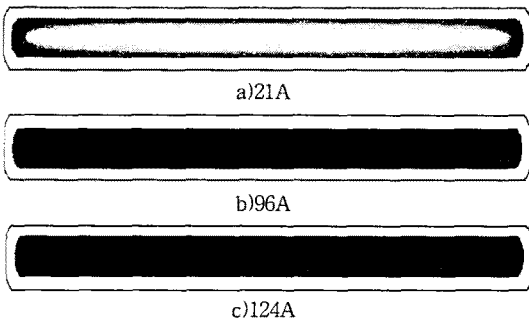


그림 2. 초전도선재 내부의 전류량에 따른 전류밀도분포

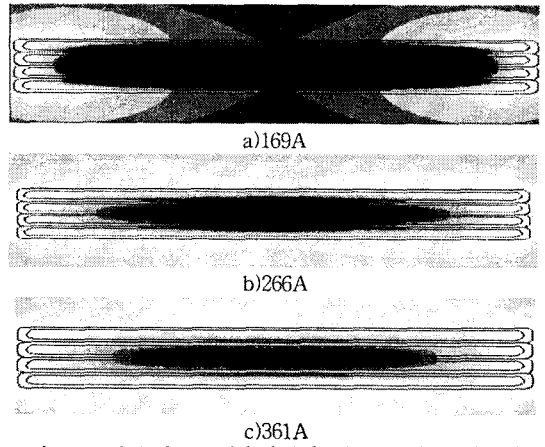


그림 3. 고온초전도 4적층선재의 전류에 따른 자속밀도 분포

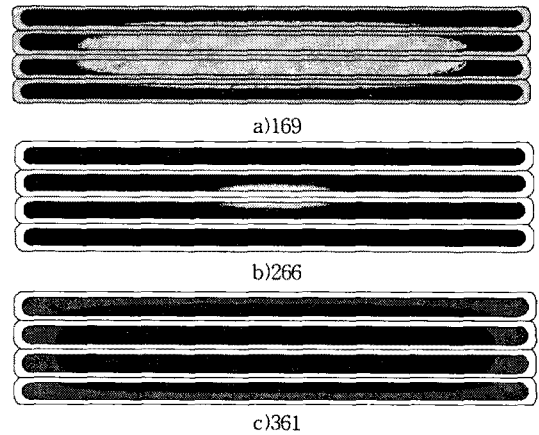


그림 4. 고온초전도 4적층선재의 전류에 따른 전류밀도 분포

그림 6은 그림5와 같은 조건에서의 전류밀도 분포도이다. 이 그림으로부터 초전도체의 내부에서의 전류 밀도 분포가 자장의 세기가 증가함에 따라 전류밀도 분포가 한쪽으로 밀려져 있는 것이 잘 나타나 있다.

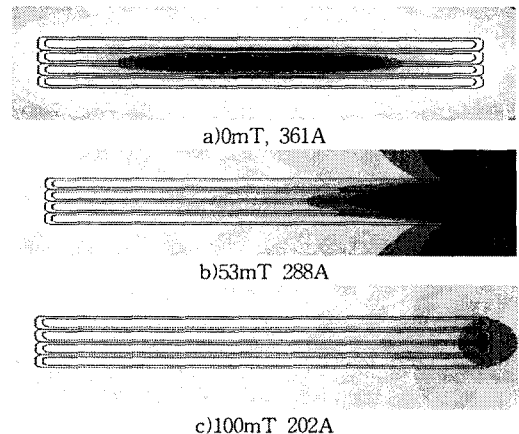


그림 5. 4적층선재에서 임계전류일 때 외부자장에 따른 자속밀도분포

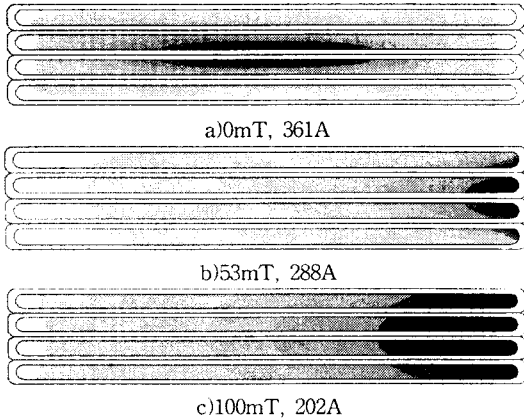


그림 6. 4적층선재에서 임계전류일 때 외부자장 변화에 따른 전류밀도 분포

2.2.1 해석 및 측정결과

그림 7과 그림 8은 각각 단일 선재와 4적층 선재의 임계전류를 측정된 결과와 계산의 의한 결과를 비교한 것이다. 단일 및 4적층 선재의 측정 결과와 계산에 의한 결과 모두 잘 일치 하고 있음을 나타내고 있으며 임계전류값 역시 단일 샘플은 일치하고 4적층 선재의 임계값은 측정값 359A와 계산값 361A로써 2A의 차이로 매우 잘 일치 하고 있다.

그림 9와 그림 10은 단일 선재와 4적층 선재의 외부자장의 변화에 따른 임계값 변화 곡선이다. 외부자장의 0mT에서부터 100mT까지 변화를 시켰다. 단일 및 적층 선재 모두 잘 일치하고 있다.

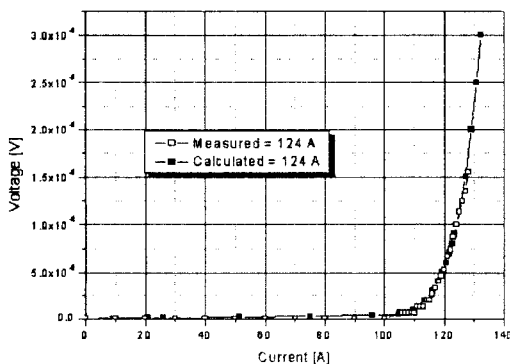


그림 7. 단일 선재의 임계전류특성 곡선

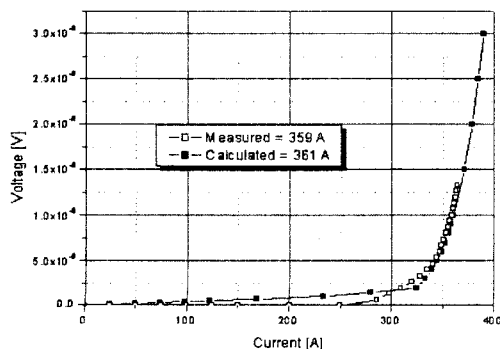


그림 8. 4적층 선재의 임계전류특성 곡선

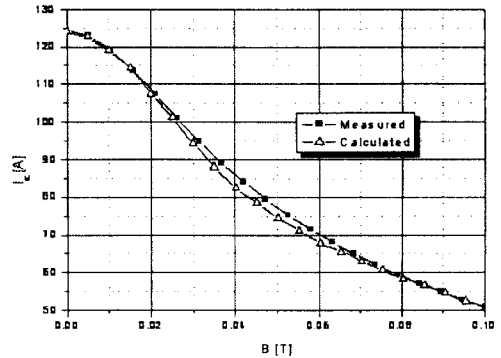


그림 9. 단일 선재의 Ic-B 특성곡선

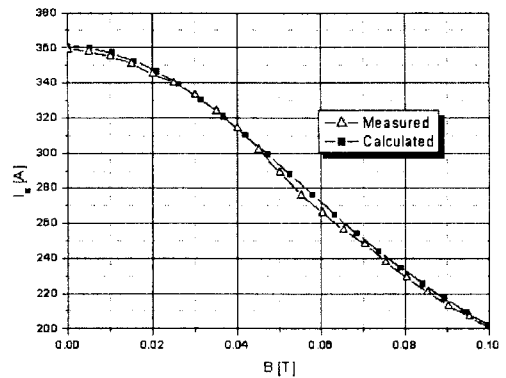


그림 10. 4적층 선재의 Ic-B 특성 곡선

3. 결 론

본 논문에서는 수치해석에 의한 방법을 사용하여 임계전류특성과 임계전류값 그리고 외부자장 변화에 따른 임계전류 변화를 계산하였다. 또한 각각의 과정에서 일어나는 초전도선재 내부에서의 전류 밀도 분포와 자속밀도 분포 등을 그림으로 나타냈다. 그 결과 단일 및 4적층 선재의 임계값과 외부자장의 변화에 따른 임계값은 측정값과 계산값 모두 잘 일치 하였으며, 각각의 계산 과정에서 전류밀도 분포와 자속밀도 분포 모두 초전도 특성을 잘 나타내고 있다. 따라서 이와 같은 방법을 사용하면 많은 실험을 수행하는 불편을 줄일 수 있을 뿐만 아니라 형상이 다양한 선재의 특성도 실험을 하지 않고서도 쉽게 예측하는 것이 가능하다.

[참 고 문 헌]

- [1] Svetlomid Stavrev, et al, "Comparison of Numerical Methods for Modeling of Superconductors," IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 38, No. 2, March, 2002.
- [2] J.Rhyner, "Magnetic properties and AC losses of superconductors with power law current-voltage characteristics," Physica V, vol. 212, pp.292-300, jul. 1993.
- [3] N. Enomoto and N. Amemiya, "Electromagnetic field analysis of rectangular high Tc superconductor with large aspect ratio," Physica C, 412-414 (2002), pp. 1050-1055.