

단일 팬케이크 권선의 임계전류의 산정

구명환, 강명훈, 이희준, 차귀수
순천향대학교

Estimation of the critical current of a single pancake winding

Myunghwan Ku, Myunghun Kang, Heejoon Lee, Guesoo Cha
Soonchunhyang University

Abstract - 초전도선으로 제작한 초전도기기의 임계전류는 초전도선에 가해지는 자장에 의해 결정된다. 초전도선에 가해지는 자장이 균일하지 않으면 임계전류를 결정하는 자장의 크기를 정하기가 어려워 임계전류를 예측하는 것이 어렵다. 본 논문에서는 초전도선에 인가되는 수직방향과 수평방향의 자장을 고려하여 초전도 권선의 임계전류를 예측할 수 있는 방법을 제시하였다. 제시한 방법으로 단일 팬케이크 권선의 임계전류와 10개의 팬케이크 권선으로 제작된 초전도마그넷의 임계전류를 계산하여 이를 실험결과와 비교하였다.

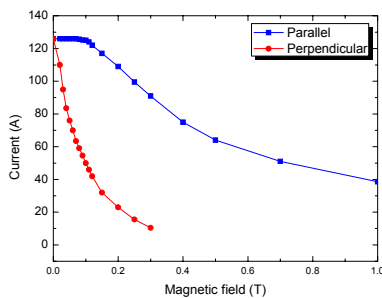
1. 서 론

초전도체에 자장이 인가되면 임계전류가 감소하기 때문에 초전도선으로 제작한 초전도기기의 임계전류는 초전도선에 가해지는 자장에 의해 결정된다. 초전도선에 균일한 외부자장이 인가되면 자장-임계전류 곡선을 이용해서 임계전류를 예측할 수 있으나, 초전도선에 가해지는 자장이 균일하지 않으면 임계전류를 결정하는 자장의 크기를 정하기가 어려워 임계전류를 예측하는 것이 어렵다. 팬케이크 권선으로 제작되는 고자장용 초전도 마그넷[1],[2] 등의 일반적인 초전도기기에서는 초전도권선에 인가되는 자장이 크기와 방향이 위치마다 다르기 때문에 초전도 권선의 임계전류를 예측하기는 어렵다.

인가되는 자장의 크기와 방향이 위치마다 다른 초전도 권선에서 임계자장을 계산하는 것은 불가능하기 때문에 본 연구에서는 실험적인 방법을 통해서 초전도 권선의 임계전류를 예측할 수 있는 방법을 제시했다. 제시한 방법으로 단일 팬케이크 권선의 임계전류와 10개의 팬케이크 권선으로 제작된 초전도마그넷의 임계전류를 계산하여 이를 실험결과와 비교하였다.

2. 초전도마그넷에 인가되는 자장

초전도선에 자장이 인가될 때 임계전류가 감소하는 정도는 수직방향 자장이 인가될 때가 크고 수평방향의 자장이 인가될 때가 적다. 그림 1은 수직방향 자장과 수평방향 자장이 초전도선에 인가될 때 BSCCO선의 임계전류를 보인 것으로 수직방향의 자장이 인가되면 임계전류가 급격히 감소하는 것을 볼 수 있다. 초전도선으로 제작하는 초전도기기의 임계전류는 그림 1과 같은 자장-임계전류 곡선과 부하선을 이용해서 결정하고 있다.

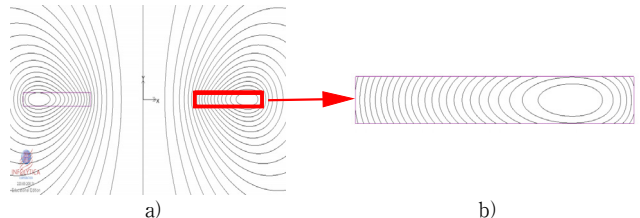


〈그림 1〉 BSCCO선의 임계전류-자장 곡선

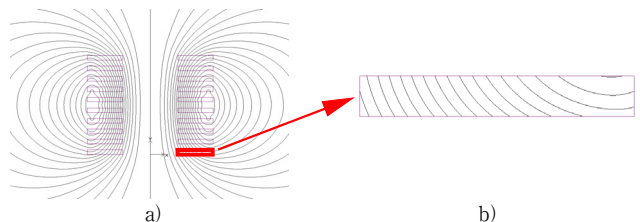
초전도선으로 권선을 한 팬케이크 권선의 경우는 팬케이크 권선의 내부에 발생하는 자장에 의해서 팬케이크 권선의 임계전류가 결정된다. 초전도 시편에서 자장-임계전류 특성을 측정할 때에는 균일한 자장을 인가하지만, 팬케이크 권선의 내부에 발생하는 자장은 모든 위치마다 다

르기 때문에 초전도시편에서 측정된 자장-임계전류 특성을 이용해서 바로 팬케이크 권선의 임계전류를 예측할 수가 없다.

그림 2.a)는 하나의 팬케이크 권선에 의해서 발생하는 자력선 분포이고 그림 2.b)는 권선부분에 인가되는 자력선 분포만 보인 것이다. 그림 3.a)는 10개의 팬케이크 권선으로 제작된 초전도마그넷의 자력선 분포이고 그림 3.b)는 10개의 팬케이크 권선 중에서 가장 아래쪽에 위치한 팬케이크 권선에 인가되는 자력선 분포를 보인 것이다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 팬케이크 권선 내부의 자력선은 위치마다 크기와 방향이 다를 뿐만 아니라 팬케이크 권선의 구성과 위치에 따라서도 크게 달라진다.



〈그림 2〉 단일 팬케이크 권선의 의해서 발생하는 자력선 분포



〈그림 3〉 10개의 팬케이크 권선으로 구성된 초전도마그넷에 의해서 발생하는 자력선 분포

3. 초전도선과 초전도마그넷에 인가되는 자장의 산정

초전도마그넷을 구성하는 팬케이크 권선에 가해지는 자장이 위치마다 크기와 방향이 다르기 때문에 팬케이크 권선의 임계전류에 영향을 미치는 자장의 크기를 결정할 방법을 다음과 같이 정한다. 본 연구에서는 N턴 감긴 팬케이크 권선의 각각의 턴을 구성하는 초전도선을 M개의 요소로 나누어서 각각의 요소에 인가되는 자장 B_i 를 구하고 이들의 평균값을 n번째 턴의 초전도선에 인가되는 자장 B_n 으로 정한다.

$$B_n = \left(\sum_{i=1}^M |B_i| \right) / M \quad (1)$$

식 (1)에서 구한 B_n 은 한 턴에 가해지는 자장으로 이 자장이 N턴 감긴 전체 권선의 임계전류를 전적으로 결정하지는 않는다. 팬케이크 권선의 모든 턴 중에서 인가되는 자장이 가장 큰 턴에 인가되는 평균자장 $\max(B_n)$ 에 상수 C를 곱한 B_0 를 팬케이크 권선에 인가되는 자장의 크기로 정한다.

$$B_a = C \cdot \max(B_n), n=1, N \quad (2)$$

상수 C는 한 턴에 가해지는 자장이 전체 권선의 임계전류에 미치는 영향의 정도를 고려한 상수이다. 즉 C가 1이면 자장이 가장 높은 턴의

자장이 권선 전체의 임계전류를 결정하는 자장이고 C 가 0.5이면 자장이 가장 높은 턴에 인가되는 자장의 절반이 권선 전체의 임계전류를 결정하는 자장이라는 것을 의미한다.

권선의 임계전류를 결정하는 데에 사용되는 수직방향 자장과 수평방향 자장을 모두 위와 같은 방식으로 정하였고 수직방향 자장에 의한 임계전류와 수평방향 자장에 의한 임계전류 중에서 작은 것이 팬케이크 권선의 임계전류가 된다. 이와 같은 방식으로 계산하면 각각의 팬케이크 권선의 임계전류도 구할 수 있다.

4. 임계전류 산정 결과

위에서 제시한 방법으로 BSCCO 초전도선으로 권선한 단일 팬케이크 권선의 임계전류와 10개의 팬케이크 권선으로 제작된 초전도마그넷의 임계전류를 산정한 결과와 실험을 통해서 측정된 결과를 비교하였다. 사용된 BSCCO 초전도선의 사양은 표 1과 같고 초전도 마그넷의 사양은 표 2와 같다. 각각의 팬케이크 권선의 권선수는 93이고 턴 사이에는 전기적인 절연을 위해서 두께가 60 μ m인 절연물을 넣었다.

<표 1> BSCCO 초전도선의 사양

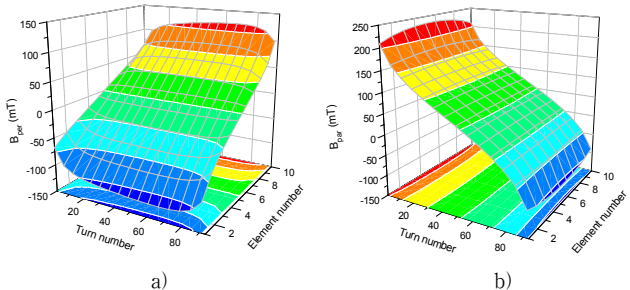
물질	Ic	두께	폭
BSCCO-2223	126A, self-field, 77K	0.285mm	4.4mm

<표 2> 초전도 마그넷의 사양

권선	내경	외경	높이	절연물	턴 수
	50mm	114mm	4.4mm	0.06mm	93
마그넷	내경	외경	높이	권선 수	총 턴 수
	50mm	114mm	100mm	10개	930

4.1 단일 팬케이크 권선

그림 4는 단일 팬케이크 권선에서 권선부에 인가되는 자속밀도를 표시한 것으로 그림 4.a)는 수직자장이고 그림 4.b)는 수평자장이다. 세로축(1-10)은 10개의 요소로 나뉜 초전도선의 각 부분을 표시하고 가로축(1-93)은 93턴 각각을 표시한다. 계산 결과에 의하면 최대 수직자장은 중심에서 밖으로 59번째 턴에서 발생했고 식 (1)로 구한 평균치는 65mT이었고 최대 수평자장은 중심에 가장 가까운 턴에서 발생하고 크기는 224mT이었다.



**<그림 4> 단일 팬케이크 권선에서 권선에 인가되는 자속밀도
a) 수직자장 b) 수평자장**

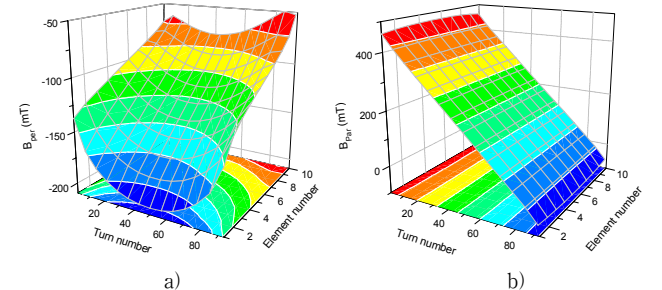
표 2와 같은 초전도 마그넷을 제작하여 임계전류를 측정된 결과 단일 팬케이크 권선의 임계전류는 75.0A이었다. C 를 변화시키면서 식 (2)로 계산한 수직자장, 수평자장과 그림 1의 자장-임계전류 곡선을 이용해서 임계전류를 계산한 결과는 표 3과 같다. C 가 0.71인 경우에 계산된 임계전류와 측정된 임계전류(75A)가 같게 된다. 표 3에서 수평자장에 의한 임계전류가 측정된 임계전류보다 큰 것은 수평자장이 임계전류에 영향을 미치지 않고 임계전류는 수직자장에 의해서 결정된다는 것을 의미한다.

<표 3> C의 변화에 따른 단일 권선의 임계전류 계산 결과

	수직자장		수평자장	
	임계전류 (A)	자속밀도 (mT)	임계전류 (A)	자속밀도 (mT)
1	62.70	65	93.99	224
0.9	66.63	59	96.7	202
0.8	70.95	52	99.63	180
0.7	75.72	46	102.45	157

4.2 10개의 팬케이크 권선으로 구성된 마그넷

그림 5는 10개의 팬케이크 권선으로 구성되는 초전도 마그넷의 권선부에 인가되는 자속밀도를 표시한 것으로 그림 5.a)는 수직자장이 가장 높은 가장 아래쪽 팬케이크 권선부의 수직방향 자속밀도이고 그림 5.b)는 수평자장이 가장 높은 가장 안쪽 팬케이크 권선부의 수평방향 자속밀도이다. 계산 결과에 의하면 최대 수직 자장은 가장 아래 팬케이크 권선의 중심에서 밖으로 46번째 턴에서 발생하고 크기는 140mT이었고 최대 수평자장은 가운데 팬케이크 권선의 중심에서 가장 가까운 턴에서 발생하고 크기는 469mT이었다.



**<그림 5> 아래 권선과 가운데 권선에 인가되는 자속밀도
a) 맨 아래 권선의 수직자장 b) 가운데 권선의 수평자장**

실험을 통해서 측정된 10개의 팬케이크 권선으로 구성된 초전도 마그넷의 임계전류는 46.5A이었다. 마그넷의 임계전류는 가장 임계전류가 낮은 팬케이크 권선의 임계전류에 의해서 결정되기 때문에 가장 아래와 위에 위치한 팬케이크 권선의 임계전류가 46.5A라는 것을 의미한다. 다른 팬케이크 권선의 임계전류는 46.5A 이상이기 때문에 측정할 수 없다. C 를 변화시키면서 표 3에서와 같은 방식으로 수직자장이 가장 높은 가장 아래쪽 팬케이크 권선부의 수평자장을 이용해서 임계전류를 계산한 결과는 표 4와 같다. 단일 권선에서와 비슷하게 C 가 0.72인 경우에 계산된 임계전류와 측정된 임계전류가 일치했다. 이 경우에도 수평자장에 의한 임계전류가 측정된 임계전류보다 커서 임계전류는 수직자장에 의해서 제한된다는 것을 알 수 있다.

<표 4> C에 따른 10개 권선의 임계전류 계산 결과

	수직자장		수평자장	
	임계전류 (A)	자속밀도 (mT)	임계전류 (A)	자속밀도 (mT)
1	34.83	140	69.91	469
0.9	38.56	126	73.81	422
0.8	42.72	112	78.02	376
0.7	47.52	98	82.57	329

5. 결 론

본 연구에서는 팬케이크 권선의 임계전류를 산정하는 방법을 제시했다. 단일 팬케이크 권선과 10개의 팬케이크 권선으로 제작한 초전도 마그넷을 확인한 결과에 의하면 팬케이크 권선의 임계전류를 결정하는 자장은 식 (1)과 같은 방식으로 계산된 수직자장의 70% 정도가 되는 것으로 밝혀졌다. 본 연구에서 제시한 방법을 사용하면 팬케이크 권선의 임계전류를 산정할 수 있으므로 팬케이크 권선을 사용하는 고자장 마그넷의 임계전류를 산정할 때에 활용될 수 있다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 차세대초전도응용기술 개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

[참 고 문 헌]

[1] S. S. Kalsi, et al, "HTS SMES Magnet Design and Test Results," IEEE Trans. on AS, vol. 17, no. 2, pp. 971-976, 1997.
 [2] H. Lee, J. Bascunan and Y. Iwasa, "A High-Temperature Superconducting Double-Pancake Insert for an NMR Magnet," IEEE Trans. on AS, vol. 13, no. 2, pp. 1546-1549, 2003.