

고온초전도 BSCCO 팬케이크 권선에 인가되는 자장과 임계전류의 산정

論 文
57-11-12

Estimation of the Magnetic Field and the Critical Current of HTS BSCCO Pancake Windings

具明煥* · 姜明勳* · 李喜俊** · 車貴守†
(Myunghwan Koo · Myunghun Kang · Heejoon Lee · Gueesoo Cha)

Abstract - Critical current of the superconducting machines is limited by the magnetic field. When the magnetic field is not uniform, it is difficult to estimate the magnetic field and the critical current. This paper proposed a method for the estimation of the magnetic field and the critical current of the HTS pancake windings which can be used to generate the high field magnet. A parameter which was needed to calculate the critical current of a BSCCO magnet with 10 pancake windings was obtained by the experiment. Test which was carried out by using single pancake winding and magnet consisting of 10 pancake windings shows the proposed method can be an effective method for the estimation of the critical current of pancake windings.

Key Words : Critical current, Pancake winding, Superconducting magnet

1. 서 론

초전도체에 자장이 인가되면 임계전류가 감소하기 때문에 초전도선으로 제작한 초전도기기의 임계전류는 초전도선에 가해지는 자장에 의해서 결정된다. 초전도선에 균일한 외부 자장이 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 초전도 마그넷 등의 일반적인 초전도기기에서는 초전도권선에 인가되는 자장이 크기와 방향이 위치마다 다른 것은 물론이고 한 가닥의 초전도선에 인가되는 자장도 위치마다 다르기 때문에 초전도 권선의 임계전류를 예측하기가 어렵다. BSCCO 초전도선과 같이 납작한 테이프 형태로 제작되고 있는 고온초전도선에서는 이방성 때문에 수평방향의 자장이 임계전류에 미치는 영향과 수직방향의 자장이 미치는 영향이 다르기 때문에 이들을 고려해야 한다.

초전도에너지저장장치용으로 사용되거나 고자장 발생용으로 사용되는 솔레노이드형의 초전도마그넷[1],[2]을 제작하거나 여러 개의 팬케이크 권선으로 구성된 초전도마그넷을 별도전원으로 여자하는 등의 경우에[3] 팬케이크 권선의 임계전류를 정확하게 예측하는 것이 중요하기 때문에 그동안 초전도 권선에서 임계전류를 예측할 수 있는 방법에 관한 연

구결과도 해석적인 방법에 의한 것[4],[5]과 실험적인 방법에 의한 것[6],[7] 등이 발표되었다. 그러나 이들 연구에서는 초전도선을 고려하지 않고 마그넷 전체의 특성이 균일하다고 가정하고 계산하거나 한 가닥의 초전도선에 인가되는 자장을 일정하다고 가정하고 계산하였기 때문에 한 가닥의 초전도선에 인가되는 자장의 세기변화가 큰 경우에는 오차가 커지는 문제점이 있다.

본 연구에서는 초전도 팬케이크 권선의 임계전류를 예측하는 데에 필요한 인가자장을 산정하는 방법을 제시하고 제시된 방법으로 권선수가 100턴 내외인 팬케이크권선 10개 정도로 구성된 BSCCO 초전도 마그넷의 임계전류를 계산하는 데에 필요한 상수를 실험적인 방법으로 구했다. 인가자장을 산정할 때에는 한 가닥의 초전도선 내에서도 인가되는 자장의 일정하지 않은 것을 고려하여 초전도선을 여러 개의 요소로 나누어서 계산하여 실제와 근접하도록 하였다. 수직방향의 자장에 의한 임계전류와 수평방향의 자장에 의한 임계전류를 각각 계산하여 이들이 임계전류에 미치는 영향을 볼 수 있도록 하였다.

본 연구에서 제시한 자장 산정방법을 이용하여 임계전류를 계산하는 데에 필요한 상수를 구하기 위해서 고온초전도 BSCCO선으로 권선한 단일 팬케이크 권선과 10개의 팬케이크 권선으로 구성된 초전도마그넷을 제작하고 이들의 임계전류를 측정했다.

2. 팬케이크 권선으로 제작되는 초전도마그넷의 특성

초전도선에 자장이 인가될 때에 임계전류가 감소하는 정도는 수직방향 자장이 인가될 때가 크고 수평방향의 자장이 인가될 때가 적다. 그림 1은 수직방향 자장과 수평방향 자장이 초전도선에 인가될 때에 임계전류가 126A인 BSCCO선의 임계전류 변화를 보인 것으로 수직방향의 자장이 인가되

† 교신저자, 正會員 : 順天鄉大 電氣通信시스템工學科 教授 · 博士

E-mail : gsoocha@sch.ac.kr

* 學生會員 : 順天鄉大 電氣通信시스템工學科 碩士課程

** 正會員 : 順天鄉大 電氣通信시스템工學科 博士

接受日字 : 2008年 5月 26日

最終完了 : 2008年 9月 30日

면 임계전류가 급격히 감소하는 것을 볼 수 있다. 초전도선으로 제작하는 초전도기기의 임계전류는 그림 1과 같은 임계전류-자장 곡선과 부하선을 이용해서 결정하고 있다.

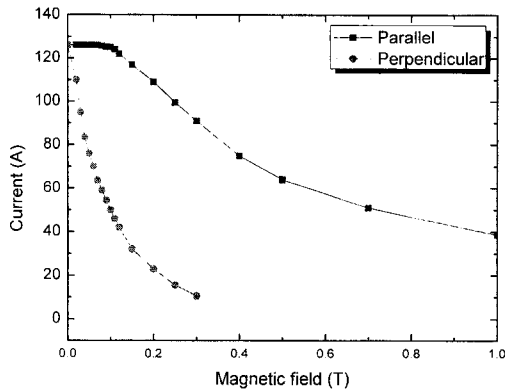


그림 1 BSCCO선의 임계전류-자장 곡선
Fig. 1 I_c -B curve of a BSCCO wire

초전도선으로 권선을 한 팬케이크 권선의 경우는 팬케이크 권선에서 발생하는 자장에 의해서 팬케이크 권선의 임계전류가 결정된다. 초전도 시편에서 자장-임계전류 특성을 측정할 때에는 균일한 자장을 인가하지만, 팬케이크 권선의 내부에 발생하는 자장은 모든 위치마다 다를 뿐만 아니라 한 가닥의 초전도선에 인가되는 자장도 다르기 때문에 초전도 시편에서 측정된 임계전류-자장 특성을 이용해서 바로 팬케이크 권선의 임계전류를 예측할 수가 없다. 이에 따라 팬케이크 권선의 임계전류를 산정할 수 있는 방법을 강구해야 한다.

그림 2(a)는 권선수가 93이고 75.0A의 전류가 흐르고 있는 팬케이크 권선에 의해서 발생하는 자력선 분포이고 그림 2(b)는 권선부분에 인가되는 자력선 분포이다. 그림 3(a)는 각각의 권선수가 93이고 46.5A의 전류가 흐르고 있는 10개의 팬케이크 권선으로 구성된 초전도마그넷의 자력선 분포이고 그림 3(b)는 10개의 팬케이크 권선 중에서 가장 아래쪽에 위치한 팬케이크 권선에 인가되는 자력선 분포이다. 그림 2와 그림 3에서 볼 수 있는 바와 같이 팬케이크 권선 내부의 자력선은 위치마다 크기와 방향이 다를 뿐만 아니라 팬케이크 권선의 구성과 위치에 따라서도 크게 달라진다.

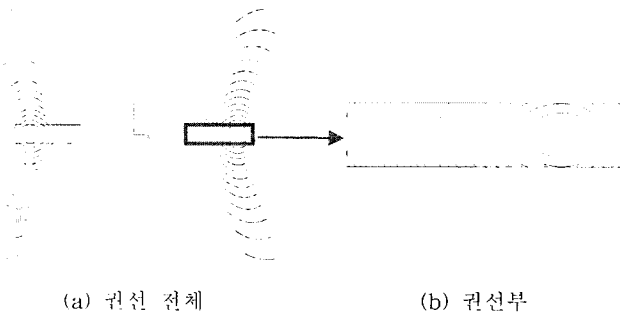


그림 2 단일 팬케이크 권선에 의해 발생하는 자력선 분포
Fig. 2 Flux distribution of a single pancake winding

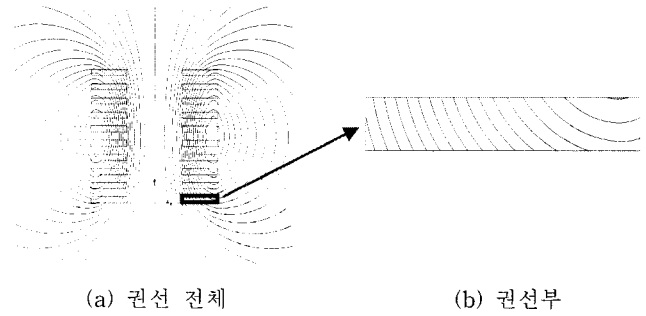


그림 3 10개의 팬케이크 권선으로 구성된 초전도마그넷에 의해서 발생하는 자력선 분포
Fig. 3 Flux distribution of a magnet consisting of 10 pancake windings

3. 초전도선과 초전도마그넷에 인가되는 자장의 산정 방법

초전도마그넷을 구성하는 팬케이크 권선에 가해지는 자장이 위치마다 크기와 방향이 다르기 때문에 본 연구에서는 팬케이크 권선의 임계전류에 영향을 미치는 자장의 크기를 다음과 같은 방법으로 결정한다. 그림 4와 같이 N 턴 감긴 팬케이크 권선의 각각의 턴을 구성하는 초전도선을 M 개의 요소로 나누어서 각각의 요소에 인가되는 자장 B_i 를 구하고 이를 수직방향 자장 $B_{i\perp}$ 와 수평방향 자장 $B_{i//}$ 로 나눈다. n 번째 턴의 초전도선에 인가되는 자장의 $B_{i\perp}$ 와 $B_{i//}$ 의 평균값을 n 번째 턴의 수직방향 자장 $B_{n\perp}$ 와 수평방향 자장 $B_{n//}$ 으로 정한다.

$$B_{n\perp} = \left(\sum_{i=1}^M |B_{i\perp}| \right) / M \quad (1)$$

$$B_{n//} = \left(\sum_{i=1}^M |B_{i//}| \right) / M \quad (2)$$

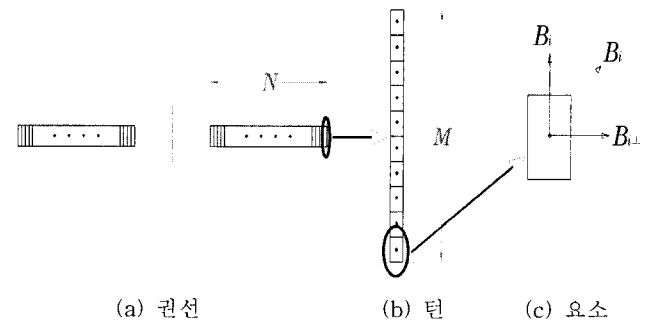


그림 4 팬케이크 권선 및 턴
Fig. 4 Structure of winding and turn

식 (1)과 식 (2)에서 구한 수직방향 자장 $B_{n\perp}$ 과 수평방향 자장 $B_{n//}$ 은 한 턴에 가해지는 자장으로, N 턴 감긴 전체 권선의 임계전류는 한 턴에 인가되는 자장에 의해서만 결정되

는 것은 아니다. 초전도 권선의 임계전류는 가장 임계전류가 낮은 부분에 의해서 결정되지만 실제로는 전체 권선의 임계전류는 이보다 크다. 이와 같은 점을 고려하기 위해서 팬케이크 권선의 모든 턴 중에서 인가되는 자장이 가장 큰 턴에 인가되는 수직방향 자장 $\max(B_{n\perp})$ 과 수평방향 자장 $\max(B_{n//})$ 에 상수 C 를 곱한 $B_{a\perp}$ 와 $B_{a//}$ 를 팬케이크 권선에 인가되는 수직방향 자장과 수평방향 자장의 크기로 정한다.

$$B_{a\perp} = C \cdot \max(B_{n\perp}), n=1, N \quad (3)$$

$$B_{a//} = C \cdot \max(B_{n//}), n=1, N \quad (4)$$

상수 C 는 한 턴에 가해지는 자장이 전체 권선의 임계전류에 미치는 영향의 정도를 고려한 값으로 C 가 1이면 자장이 가장 높은 턴에 인가되는 자장 B_n 이 권선 전체의 임계전류를 결정하는 자장이고 C 가 0.5이면 자장이 가장 높은 턴에 인가되는 자장 B_n 의 절반이 권선 전체의 임계전류를 결정하는 자장이라는 것을 의미한다. C 를 해석적인 방법으로 정확하게 계산하는 것은 대단히 어려우나 실험적인 방법을 통해서 C 의 범위를 대략적으로 예측하는 것은 가능하다.

팬케이크 권선에 인가되는 수직방향의 자장과 수평방향의 자장이 식 (3), 식 (4)와 같이 정해지면 그림 1로부터 수직방향 자장에 의한 임계전류와 수평방향에 의한 임계전류를 구할 수 있다. 이렇게 해서 구한 수직방향의 자장에 의한 임계전류와 수평방향의 자장에 의한 임계전류 중에서 적은 것이 팬케이크 권선의 임계전류가 된다. 식 (3), 식 (4) 그리고 그림 1을 이용하면 팬케이크 권선으로 제작되는 초전도마그넷의 임계전류는 물론 초전도마그넷을 구성하는 각각의 팬케이크 권선의 임계전류도 구할 수 있다. 본 연구에서는 초전도마그넷에 인가되는 자장을 비오사마르의 법칙을 이용해서 직접적분방식으로 계산했다.

4. 초전도마그넷의 제작 및 임계전류 측정

위에서 제시한 방법으로 초전도마그넷의 임계전류를 산정한 결과와 실제 임계전류를 비교하기 위해서 BSCCO 초전도선으로 권선한 단일 팬케이크 권선과 10개의 팬케이크 권선으로 구성된 초전도마그넷을 제작했다. 사용된 BSCCO 초전도선은 $1\mu\text{V}/\text{cm}$ 의 기준을 적용했을 때에 임계전류가 126A이었다. BSCCO 초전도선의 기타 사양은 표 1에 제시되어 있다. 사용된 팬케이크 권선과 10개의 팬케이크 권선을 직렬로 연결해서 제작한 초전도마그넷의 사양은 표 2와 같다. 초전도마그넷의 내경은 50mm, 외경은 114mm이었고 전체높이는 100mm이었다. 초전도마그넷의 전체 권선수는 930턴이고 턴 사이에는 전기적인 절연을 위해서 두께가 $60\mu\text{m}$ 인 절연물을 넣었다.

표 1 BSCCO 초전도선의 사양

Table 1 Specification of the BSCCO wire

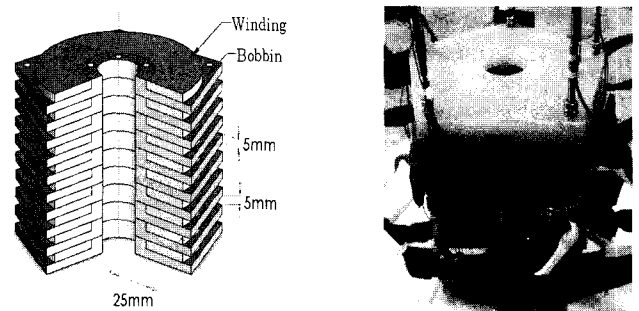
물질	I_c	두께	폭
BSCCO-2223	126A, self-field, 77K	0.285mm	4.4mm

표 2 팬케이크 권선과 초전도 마그넷의 사양

Table 2 Specification of the pancake winding and the magnet

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

그림 5(a)는 초전도마그넷의 단면이고 그림 5.b)는 제작된 초전도마그넷으로 권선을 감는 데에 사용한 보빈은 단자를 연결하기 쉽게 5각형 모양으로 제작했고 초전도마그넷 전체를 액체 질소에 넣어서 특성을 측정했다. FRP로 제작된 보빈과 권선이 만나는 부분에 냉각채널을 파서 초전도 권선의 극저온 안정성을 높이도록 했다.



(a) 단면도

(b) 제작된 초전도마그넷

그림 5 10개의 팬케이크 권선으로 구성된 초전도마그넷

Fig. 5 Cross-section and the constructed magnet

제작된 초전도마그넷의 임계전류를 측정한 결과 단일 팬케이크 권선의 임계전류는 75.0A이었고 10개의 팬케이크 권선으로 구성된 초전도마그넷의 임계전류는 46.5A이었다. 단일 팬케이크 권선의 최외각 턴에 인가되는 수직방향의 자장을 측정한 결과는 그림 6과 같다. 폭이 4.2mm인 BSCCO 초전도선이 놓인 위치는 +2.2mm에서 -2.2mm 사이이다.

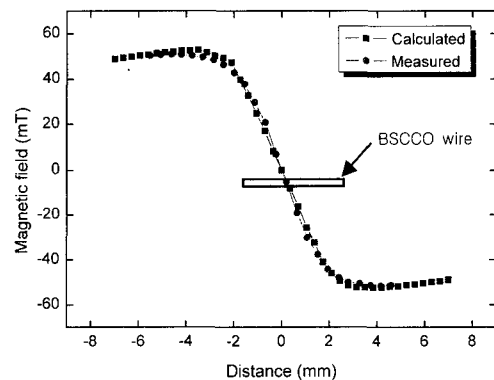


그림 6 단일 팬케이크 권선의 최외각 턴에 인가되는 수직방향의 자장

Fig. 6 Perpendicular magnetic field at the outside of the outermost turn

그림 6에서 사각형 기호는 수직방향의 자장을 계산한 결과이고 원형 기호는 제작된 단일 팬케이크 권선을 계산된 결과와 같은 지점에서 측정된 결과로서 비교적 일치함을 볼 수 있다.

5. 초전도마그넷의 임계전류 계산 결과

5.1 단일 팬케이크 권선

그림 7은 단일 팬케이크 권선에서 권선에 인가되는 자장분포를 보인 것으로 그림 7(a)는 수직방향의 자장이고 그림 7(b)는 수평방향의 자장이다. 그림 7에서 세로축(1-10)은 10개의 요소($M=10$)로 나뉜 초전도선의 각 요소를 표시하고 가로축(1-93)은 93턴 각각을 표시한다. 계산 결과에 의하면 최대 수직자장은 중심에서 밖으로 59번째 턴에서 발생했고 59번째 턴에 인가되는 최대 수직자장($\max(B_{n\perp})$)은 65mT이었고 최대 수평자장($\max(B_{n\parallel})$)은 중심에 가장 가까운 턴에 발생하고 크기는 224mT이었다. 한 턴에 인가되는 수직자장($B_{n\perp}$)은 59번째 턴의 경우에 -126mT에서 +126mT까지 변화하여 변화가 컸고 수평자장($B_{n\parallel}$)은 45mT에서 36mT까지 변화하여 변화가 크지 않다.

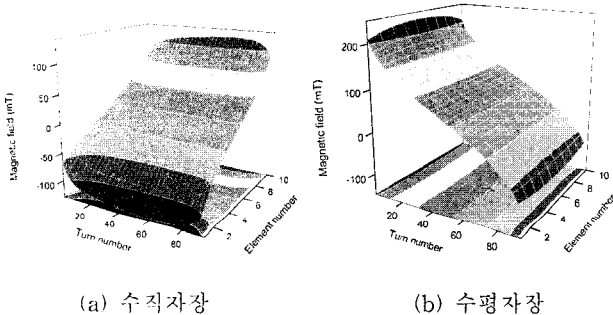


그림 7 단일 팬케이크 권선에서 권선에 인가되는 자장분포
Fig. 7 Magnetic field of a single pancake winding

식 (3)과 식(4)에서 C 를 1에서 0.7까지 변화시키면서 계산한 수직방향의 자장, 수평방향의 자장과 그림 1의 임계전류 자장 곡선을 이용해서 임계전류를 계산한 결과는 표 3과 같다. C 가 1인 경우는 턴에 인가되는 최대 수직방향 자장 65mT가 초전도마그넷 전체에 인가될 때에 임계전류를 구하는 것과 같은 의미이고 C 가 0.7인 경우는 65mT의 70%인 46mT가 초전도마그넷 전체에 인가될 때에 임계전류를 구하는 것과 같은 의미이다. 계산 결과에 의하면 C 가 1인 경우의 임계전류는 62.70A로서 측정된 임계전류인 75.0A보다 작아 수평방향의 자장이 과다하게 고려된 것임을 알 수 있어 수평방향의 자장을 낮추어 잡아야 한다.

반복 계산을 통해서 측정된 임계전류와 계산된 임계전류가 같아지는 C 값을 찾은 결과 C 가 0.71인 경우에 계산된 임계전류와 측정된 임계전류가 같게 되었다. 표 3에서 수평방향의 자장에 의한 임계전류는 모든 C 값에서 측정된 임계전류보다 크고 이는 수평방향의 자장이 임계전류에 영향을 미치지 못하고 임계전류는 수직방향의 자장에 의해서만 결정된다는 것을 의미한다.

표 3 C 의 변화에 따른 단일 권선의 임계전류 계산 결과
Table 3 Critical current of a single pancake winding versus C

C	수직자장		수평자장	
	임계전류 (A)	자속밀도 (mT)	임계전류 (A)	자속밀도 (mT)
1	62.70	65	93.99	224
0.9	66.63	59	96.70	202
0.8	70.95	52	99.63	180
0.7	75.72	46	102.45	157

5.2 10개의 팬케이크 권선으로 구성된 초전도마그넷

10개의 팬케이크 권선으로 초전도마그넷을 구성할 경우 상하 대칭이기 때문에 맨 위로부터 중심방향으로 5개 권선과 맨 아래로부터 중심방향으로 5개 권선에 인가되는 자장과 임계전류는 동일하다.

그림 8은 10개의 팬케이크 권선으로 구성되는 초전도 마그넷의 맨 아래 팬케이크 권선에 인가되는 자장의 세기를 표시한 것으로 이 팬케이크 권선에 인가되는 수직방향 자장이 가장 강하다. 그림 8(a)는 가장 아래쪽 팬케이크 권선의 수직방향 방향 자장이고 그림 8(b)는 수평방향 자장이다. 가로축과 세로축이 표시하는 것은 그림 7과 동일하다. 최대 수직자장($\max(B_{n\perp})$)은 가장 아래 팬케이크 권선의 중심에서 밖으로 46번째 턴에서 발생하고 크기는 140mT이었고 최대 수평자장($\max(B_{n\parallel})$)은 가운데 팬케이크 권선의 중심에서 가장 가까운 턴에서 발생하고 크기는 224mT이었다. 10개의 팬케이크 권선으로 구성되는 초전도마그넷 맨 아래 팬케이크 권선의 경우에도 한 턴에 인가되는 수직방향 자장은 가장 강한 수직방향 자장이 인가되는 46번째 턴의 경우에 -204mT에서 -78mT까지 비교적 크게 변했고 수평자장은 201mT에서 202mT로 거의 변화가 없었다.

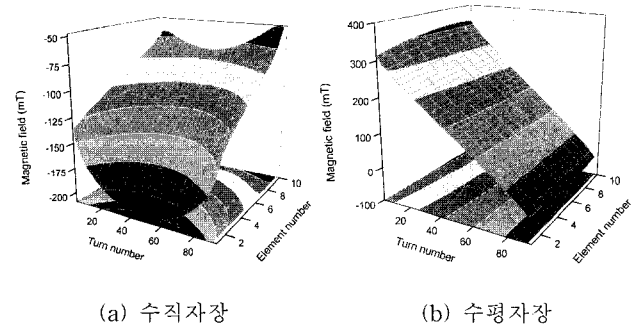


그림 8 아래 권선에 인가되는 자장분포
Fig. 8 Magnetic field of a bottom pancake winding

그림 9는 10개의 팬케이크 권선으로 구성되는 초전도마그넷의 가운데 팬케이크 권선에 인가되는 자장의 세기를 표시한 것으로 이 팬케이크 권선에 인가되는 수평방향 자장의 세기가 가장 강하다. 그림 9(a)는 가운데 팬케이크 권선의 수직방향 자장이고 그림 9(b)는 수평방향 자장이다. 최대 수

평자장($\max(B_{n//})$)은 가운데 팬케이크 권선의 중심에서 밖으로 첫번째 턴에서 발생하고 크기는 469mT이었고, 최대 수직자장($\max(B_{n\perp})$)은 권선의 중심에서 밖으로 76번째 턴에서 발생하고 크기는 29mT이었다. 이 때에도 한 턴에 인가되는 수직방향 자장은 가장 강한 수평방향 자장이 인가되는 첫번째 턴의 경우에 -36mT에서 21mT까지 비교적 크게 변했고 수평자장은 461mT에서 474mT로 변화가 크지 않았다.

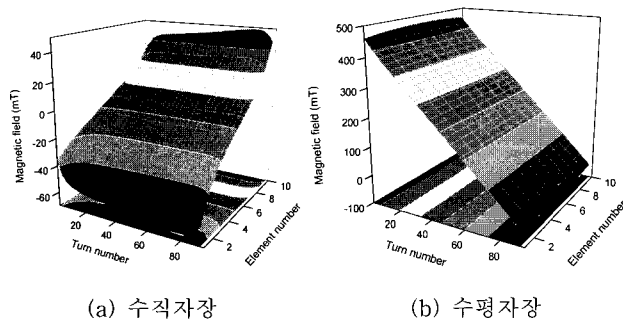


그림 9 가운데 권선에 인가되는 자속밀도
Fig. 9 Magnetic field of a center pancake winding

실험을 통해서 측정한 10개의 팬케이크 권선으로 구성된 초전도 마그넷의 임계전류는 46.5A이었다. 마그넷의 임계전류는 가장 임계전류가 낮은 팬케이크 권선의 임계전류에 의해서 결정되기 때문에 초전도마그넷의 임계전류가 46.5A라는 것은 가장 아래와 위에 위치한 팬케이크 권선의 임계전류가 46.5A라는 것을 의미한다. 아래와 위 팬케이크 권선을 제외한 다른 팬케이크 권선의 임계전류는 46.5A 이상이기 때문에 일반적인 방법으로는 측정할 수 없다.

C를 변화시키면서 표 3에서와 같은 방식으로 수직자장이 가장 높은 가장 아래쪽 팬케이크 권선부의 수직자장과 수평자장이 가장 높은 가장 안쪽 팬케이크 권선 수평자장을 이용해서 임계전류를 계산한 결과는 표 4와 같다. 단일 권선에서와 비슷하게 C가 0.72인 경우에 계산된 임계전류와 측정된 임계전류가 일치했다. 이 경우에도 수평자장에 의한 임계전류는 모든 C에 대해서 측정된 임계전류인 46.5A 보다 커서 임계전류는 수직자장에 의해서 제한된다는 것을 알 수 있다.

표 4 C에 따른 10개 팬케이크 권선으로 구성된 초전도 마그넷의 임계전류 계산 결과

Table 4 Critical current of a magnet consisting of 10 pancake windings versus C

C	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

단일 팬케이크 권선과 10개의 팬케이크 권선으로 구성된 초전도마그넷에서 C에 따른 임계전류 변화를 측정값과 같이 그리면 그림 10과 같다. 그림 10에서 위쪽 4각형 기호는 단일 팬케이크 권선의 C에 따른 임계전류 변화를 그린 것이고 굵은 점선은 이때의 측정값 75.0A이다. 아래쪽 원형 기호는 10개의 팬케이크 권선으로 구성된 초전도마그넷의 C에 따른 임계전류 변화를 그린 것이고 가는 점선은 이때의 측정값 46.5A이다. 두 경우 모두 C가 0.7 근처에서 계산된 임계전류와 측정된 임계전류가 같아지는 것을 볼 수 있다.

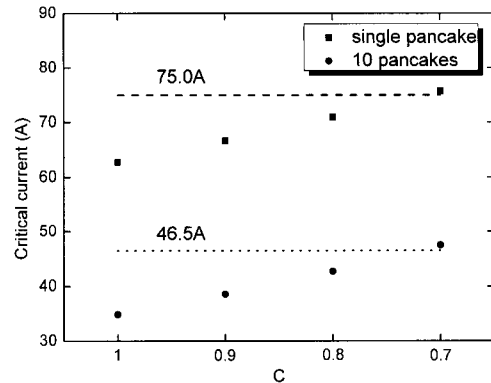


그림 10 C에 따른 임계전류 변화
Fig. 10 Critical current versus C

이상의 결과로부터 100턴 내외로 권선된 팬케이크 권선과 10개 내외의 팬케이크 권선으로 구성된 초전도마그넷의 임계전류를 산정할 때에는 최대 수직자장($\max(B_{n\perp})$)의 70% 정도만 고려해야 하는 것을 알 수 있다. 또한 단일 팬케이크 권선과 10개의 팬케이크 권선으로 구성된 초전도마그넷의 임계전류는 수직자장에 의해서 제한되고 수평자장은 임계전류에 영향을 미치지 못하는 것도 확인할 수 있다.

5. 결 론

초전도마그넷에 가해지는 자장은 위치에 따라서 크기와 방향이 크게 차이가 나서 임계전류를 결정하는 자장을 산정하기가 어렵다. 본 연구에서는 팬케이크 권선과 팬케이크 권선으로 구성된 초전도마그넷의 임계전류를 산정하는 방법을 제시했다. 단일 팬케이크 권선과 10개의 팬케이크 권선으로 구성된 초전도 마그넷을 제작해서 확인한 결과에 의하면 팬케이크 권선의 임계전류를 결정하는 자장은 최대 수직자장($\max(B_{n\perp})$)이 가장 높은 턴에 인가되는 최대 수직자장의 70% 정도가 되는 것으로 밝혀졌다. 본 연구에서 제시한 결과는 권선수가 100턴 내외인 팬케이크 권선 10개 정도로 구성된 BSCCO 마그넷의 임계전류를 산정할 때 활용될 수 있다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 특정기초연구 (R01-2006-000-10499-0) 지원으로 수행되었음.

참 고 문 헌

- [1] M. Beckenbach, et al., "Manufacture and Test of a 5 T Bi-2223 Insert Coil," IEEE Trans. on Applied Superconductivity, vol. 15, no. 2, pp. 1484-1487, 2005.
- [2] H. Lee, J. Bascunan and Y. Iwasa, "A High-Temperature Superconducting Double-Pancake Insert for an NMR Magnet," IEEE Trans. on Applied Superconductivity, vol. 13, no. 2, pp. 1546-1549, 2003.
- [3] K. Lee, M. Kang, G. Cha, H. Lim and T. Ahn, "Properties of an HTS Magnet with Pancake Windings Excited by Multiple Power Sources," IEEE Trans. on Applied Superconductivity, vol. 17, no. 2, 2007, In print
- [4] J. Pitel, P. Kovac and I. Husek, " Calculation of the critical current of Bi(2223)/Ag tapes and coils with reduced anisotropy in $I_c(B)$ characteristic - effect of different proportional representations of the filaments oriented parallel and perpendicularly to the tape surface," Physica C, 330, pp. 130-140, 2000.
- [5] A. Korpela, et al., "Relation between different critical current criteria and quench current in HTS magnets," Physica C, 372-376, pp. 1360-1363, 2002.
- [6] M. Yamaguchi, et al., "A Study on Performance Improvements of HTS Coil," IEEE Trans. on Applied Superconductivity, vol. 13, no. 2, pp. 1848-1851, 2003.
- [7] S. Ishiguri, et al., "Study on the optimum design of a high temperature superconducting coil," Physica C, 426-431, pp. 1390-1396, 2005.

저 자 소 개



구 명 환 (具明煥)

1983년 1월 14일생, 2008년 순천향대 공대 정보기술공학부 졸업, 현재 동대학원 석사과정
Tel : 041-5320-1334
E-mail : kunine@sch.ac.kr



강 명 훈 (姜明勳)

1983년 4월 17일생, 2008년 순천향대 공대 정보기술공학부 졸업, 현재 동대학원 석사과정
Tel : 041-530-1334
E-mail : kszard@sch.ac.kr



이 희 준 (李喜俊)

1969년 5월 15일 생. 1994년 순천향대 공대 전기공학과 졸업 1996년 동대학원 전기공학과 졸업(석사), 동대학원 전기공학과 졸업(박사), 현재 순천향대학교 계약 교수
Tel : 041-530-1334
E-mail : heejuon@sch.ac.kr



차 귀 수 (車貴守)

1956년 7월 8일생. 1978년 서울대 공대 공업교육과 졸업, 1987년 동대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 순천향대 전기통신공학과 교수.
Tel : 041-530-1334
Fax : 041-530-1548
E-mail : gsoocha@sch.ac.kr