

# 전계를 이용한 팬케이크 권선으로 제작되는 마그넷의 임계전류 산정

논문
58-3-11

## Critical Current Estimation of HTS Magnets by using Field Dependent $E-J$ Relation

강명훈\* · 구명환\* · 이희준\*\* · 차귀수†  
(Myunghun Kang · Myunghwan Koo · Heejoon Lee · Gueesoo Cha)

**Abstract** - The method to determine the operating current of HTS magnets needs to be different from that of LTS magnets. This paper presented estimation of the critical current of pancake windings. The pancake windings can be excited by a single power source or by multiple power sources. Critical currents were determined by using field dependent  $E-J$  relation. For the better estimation of the critical current, a new method to define the magnetic field of the HTS wire has been proposed. Calculated critical currents of pancake windings were compared with measured ones of the HTS BSCCO magnet consisting of 10 pancake windings. According to the test results, the estimated critical currents of pancake windings agreed well with that of measured ones. Effects of the single and multiple power source excitation on the critical currents have been also examined.

**Key Words** : HTS BSCCO magnet, Pancake winding,  $E-J$  relation, Multiple power excitation

### 1. 서론

고자장 발생용 고온초전도 마그넷을 제작하는 방법에는 테이프 형태의 고온초전도 선재를 사용하여 솔레노이드 형태로 제작하는 방법과 팬케이크 권선을 만들어 적층하는 방법 등이 있다. BSCCO 초전도 선과 같이 납작한 테이프 형태의 고온초전도 선재는 원형의 저온초전도 선재와 달리 선재의 형태로 인한 이방성을 갖기 때문에 고온초전도 마그넷의 임계전류를 산정하는 방법은 저온초전도 마그넷의 임계전류 산정방법과 차이가 있다[1].

이러한 이유로 고온초전도 마그넷의 임계전류를 산정하는 방법에 대한 연구는 일반적으로 선재의  $I_C-B$  특성 관계를 이용하거나,  $E-J$  특성 관계를 이용하여 왔다[2],[3]. 위의 두 경우 모두 고온초전도선에 인가되는 자장에 의해서 임계전류가 결정되지만 고온초전도선에 인가되는 자장을 정하는 방법은 아직까지 정해진 것이 없다. 일반적으로는 균일한 자장이 인가될 때에 측정된  $I_C-B$  특성곡선을 사용하여 임계전류를 산정해 왔으나 실제 경우에는 고온초전도선에 균일한 자장이 인가되지 않기 때문에 이와 같은 방법으로 임계전류를 산정하면 오차가 발생한다[4].

본 연구에서는 고온초전도 마그넷의 임계전류 산정에 중요한 요소인 초전도 선에 인가되는 외부자장을 정하는 방법을 제시하고, 이를 토대로  $E-J$  특성 관계를 이용하여 팬케이크 권선으로 제작되는 마그넷의 임계전류를 산정하였다.

또한 본 연구에서 제시한 마그넷의 임계전류 산정방법을 이용하여 BSCCO 고온초전도 선으로 권선한 10개의 팬케이크로 구성된 마그넷이 단일전원과 별도전원[5]으로 여자되는 경우의 임계전류 산정하고 그 특성을 계산하였으며, 동일한 사양의 마그넷을 제작하여 측정된 결과와 비교하였다.

### 2. 마그넷의 임계전류 산정

#### 2.1 초전도 선에 인가되는 자장의 정의

테이프 형태의 고온초전도 선재는 넓은 면에 가해지는 외부자장의 크기와 방향에 따라 임계전류의 양이 크게 영향을 받는다. 초전도선에 자장이 인가될 때에 임계전류가 감소하는 정도는 수직방향 자장이 인가될 때가 가장 크고 수평방향의 자장이 인가될 때가 가장 적다. 이러한 이유로 초전도 선으로 권선된 팬케이크 권선의 경우는 팬케이크 권선에서 발생하는 자장에 의해서 팬케이크 권선의 임계전류가 결정된다.

그림 1(a)는 팬케이크 권선 1개에 인가되는 자장분포를 나타내며 그림 1(b)는 팬케이크 권선 10개를 적층한 마그넷에 인가되는 자장분포를 나타낸다. 초전도 시편에서  $I_C-B$  특성을 측정할 때에는 균일한 자장을 인가하지만, 그림 1에서 알 수 있듯이 팬케이크 권선 내부에 발생하는 자장은 모든 위치마다 다를 뿐만 아니라 한 가닥의 초전도선에 인가되는 자장도 다르기 때문에 초전도 시편에서 측정된  $I_C-B$  특성을 이용해서 바로 팬케이크 권선의 임계전류를 예측할 수가 없다.

본 연구에서는 다음과 같은 방법으로 위치마다 크기와 방향이 다른 자장이 인가되고 있는 고온초전도선의 자장을 정하였다.

\* 준회원 : 순천향대 전기통신공학과 석사과정  
\*\* 정회원 : 순천향대 전기통신공학과 박사  
† 교신저자, 펠로우회원 : 순천향대 전기통신공학과 교수 · 박사  
E-mail : gssoocha@sch.ac.kr  
접수일자 : 2008년 12월 15일  
최종완료 : 2009년 2월 4일

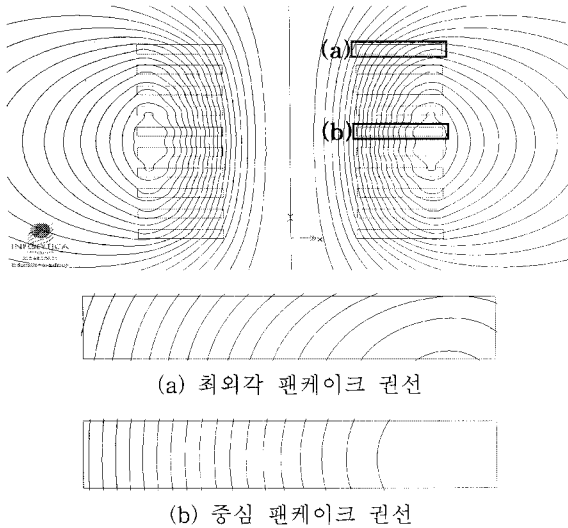


그림 1 팬케이크 권선에 인가되는 자장 분포 (a) 최외각 팬케이크 권선, (b) 중심 팬케이크 권선

Fig. 1 Magnetic field distribution of pancake winding (a) the outermost pancake winding, (b) center pancake winding

- 1) 그림 2와 같이  $N$  턴으로 권선된 고온초전도 마그넷의 각 턴을  $M$  개의 요소로 나눈다.
- 2)  $n$ 번째 턴에 인가되는 수직자장과 수평자장의 평균값을 식 (1)과 같이  $M$  개의 요소에 인가되는 자장의 산술평균으로 정한다.

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

- 3)  $n$ 번째 턴에 인가되는 자장의 크기와 각도를 식 (1)에서 계산한 수직자장과 수평자장을 이용해서 식 (2)와 같이 정한다.

$$B_n = \sqrt{B_{\perp,n}^2 + B_{//,n}^2}, \quad \theta = \tan^{-1}(B_{\perp,n} / B_{//,n}) \quad (2)$$

자장의 방향은  $0^\circ$ 에서  $90^\circ$ 까지 변하며 외부자장이 고온초전도 선재의 넓은 면에 수평으로 인가될 때의 각도를  $0^\circ$ 로 정했다.

### 2.2 임계전류 산정 알고리즘

팬케이크 권선에 흐를 수 있는 임계전류를 결정하는 외부자장은 자신의 권선에 흐르는 전류는 물론이고 다른 팬케이크 권선에 흐르는 전류에 의해서도 발생하기 때문에 각 팬케이크 권선에 흐를 수 있는 임계전류를 결정할 때에는 모든 팬케이크 권선에 흐르는 전류를 종합적으로 계산해야 한다.

본 연구에서는 마그넷이 발생하는 중심자장이 최대가 되도록 하는 각 팬케이크 권선에 흐를 수 있는 전류를 결정하기 위해서 여러 변수에 대하여 수학적으로 규명이 잘 되어

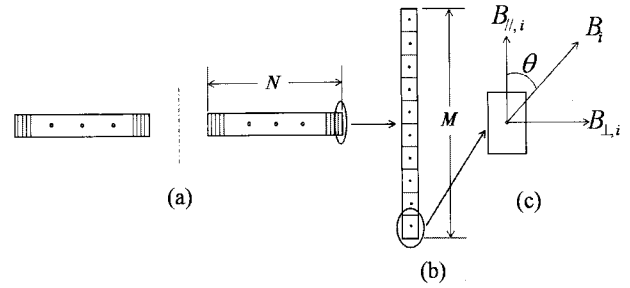


그림 2 권선, 턴, 요소의 단면 (a) 팬케이크 권선, (b) 턴, (c) 요소

Fig. 2 Cross section of a winding, turn and segment (a) pancake winding, (b) turn, (c) segment

있고 알고리즘이 간단하면서도 수렴속도가 빠른 장점을 갖고 있는 최적화 기법의 일종인 (1+1) Evolution Strategy를 사용하였다[6]. 최적화 과정에서 설계변수는 팬케이크 권선에 인가되는 전류로 설정하여 임의로 발생하는 팬케이크 권선에 흐르는 전류를 변화시켜서 목적함수인 중심자장이 최대가 되도록 했다. 팬케이크 권선의 각 턴에서의 임계전류는 각도에 따른  $I_C$ - $B$  관계를 이용해서 계산하였으며 각 턴에 인가되는 자장은 식 (1)에서 정의한 값을 사용하였다.  $E$ - $J$  특성 관계를 이용하여 각각의 팬케이크 권선에서 발생하는 전압을 계산하는 과정은 다음과 같다.

- 1) (1+1) Evolution Strategy를 사용하여  $P$ 번째 팬케이크 권선의 전류 발생
- 2) 발생된 전류로 팬케이크 권선에 인가되는 자장과 목적함수로 선택된 중심자장 계산
- 3)  $I_C$ - $B$  관계를 이용하여  $n$ 번째 턴의 임계전류 계산
- 4) 식 (3)의  $E$ - $J$  관계를 이용하여  $n$ 번째 턴의 전계 계산[7]

$$E_n(B) = E_c \left( \frac{I_p}{I_{cn}(B)} \right)^{n(B)} \quad (3)$$

위 식에서 전계기준  $E_c$ 는  $1 \mu\text{V}/\text{cm}$ 를 사용하였고  $n(B)$ 는 power-law에 결정되는 값이다.

- 5)  $P$ 번째 팬케이크 권선의 전압을 식 (4)로 계산

$$V_p = \sum_{i=1}^N E_n(B) l_n \quad (4)$$

여기서,  $l_n$ 은  $n$ 번째 턴의 길이이다.

계산된 팬케이크 권선의 전압이 허용전압을 넘으면 (1+1) Evolution Strategy를 이용하여 팬케이크 권선의 전류를 다시 발생하여 위 과정을 반복 수행한다. 중심자장을 최대

만드는 임계전류를 산정하는 과정은 다음과 같으며, 흐름도는 그림 3과 같다.

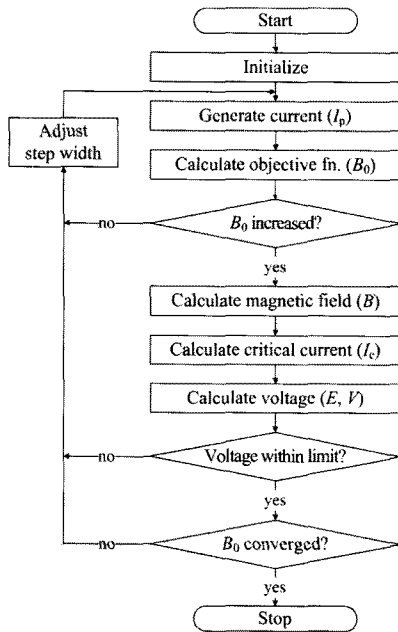


그림 3 임계전류 산정 흐름도  
Fig. 3 Flow for calculation of critical current

2.3 단일전원 여자와 별도전원 여자

팬케이크 권선을 여러 개 적층해서 마그넷을 제작하는 경우에 일반적으로 모든 팬케이크 권선을 직렬로 연결해서 단일전원으로 여자시켜 왔다. 이 경우 마그넷의 운전전류는 최대수직자장이 인가되는 최외각 팬케이크 권선에 의해 제한된다. 반면에 별도전원을 사용해서 모든 팬케이크 권선에 흐를 수 있는 임계전류까지 통전시키면 마그넷이 발생하는 중심자장을 더 높일 수 있는 장점이 있다.

10개의 팬케이크 권선으로 구성된 마그넷을 단일전원으로 마그넷을 여자하는 경우와 별도전원으로 여자하는 경우를 비교해서 그린 것이 그림 4로 그림 4(a)는 단일전원으로 여자되는 마그넷의 결선도이고 그림 4(b)는 별도전원으로 여자되는 마그넷의 결선도이다. 그림 1에서와 같이 단일전원으로 여자되는 경우에는 모든 팬케이크 권선을 직렬로 연결하여 전원을 인가하고, 별도전원으로 여자되는 경우에는 마그넷의 중심으로 위 아래가 대칭적으로 자력선 분포가 동일하고 외부자장의 세기도 동일하기 때문에 두 개씩 (맨 위와 맨 아래 권선 등) 직렬로 연결하여 5개의 전원으로 각각 인가하면 된다.

3. 고온초전도 마그넷의 특성 해석

마그넷의 임계전류를 계산하고 팬케이크 권선을 제작하기 위해 사용된 고온초전도 선은 American Superconductor사의 BSCCO 선으로 1 μV/cm의 기준을 적용했을 때에 임계전류가 126 A이며 선재의 기타 사양은 표 1과 같다. BSCCO

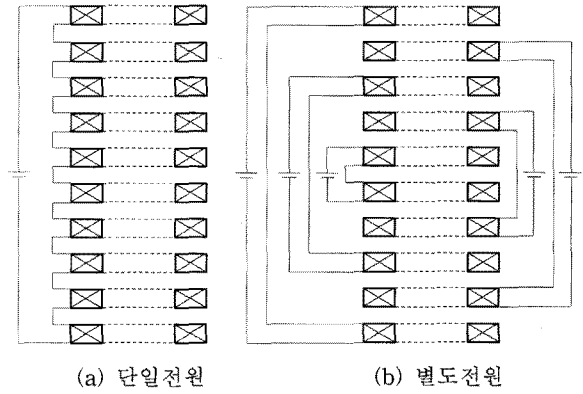


그림 4 단일전원 방식과 별도전원 방식  
Fig. 4 Two excitation methods of HTS magnet (a) Single power excitation, (b) Multiple excitation

초전도 선에 인가되는 외부자장의 크기와 방향에 대해 임계전류가 감소하는 정도는 그림 5의  $I_c-B$  특성 곡선으로 나타났다. 그림 5에서 각도는 자장의 방향을 나타내는 것으로 0°는 고온초전도 선재의 넓은 면에 수평으로 인가될 때이고 90°는 수직으로 인가될 때이다.

10개의 팬케이크 권선을 적층한 고온초전도 마그넷의 구조는 그림 6과 같고 그 사양은 표 2에 나타났다. 각 팬케이크 권선에 권선된 초전도 선의 턴 수와 선재의 길이는 각각 93 턴, 25.4 m이며, 인접한 팬케이크 권선 사이의 거리는 5 mm

표 1 BSCCO 선재의 사양  
Table 1 Specification of the BSCCO wire

임계전류	126 A, 77 K, 0 T
두께	0.285 mm
폭	4.4 mm
최대 인장강도	250 MPa
최소 구부림 반경	38 mm

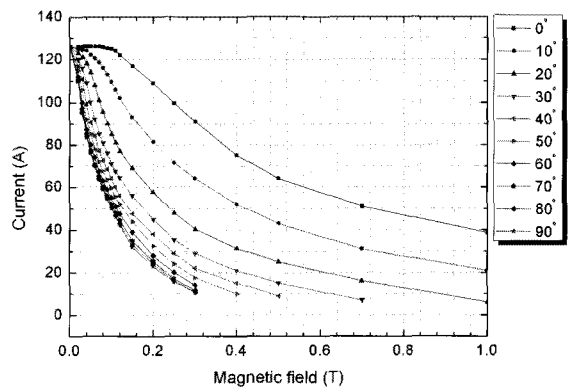


그림 5 외부자장의 방향과 크기에 따른 BSCCO 선재의  $I_c-B$  특성곡선  
Fig. 5  $I_c-B$  relation of BSCCO wire

이다. 마그넷의 내경은 선재의 최소 구부림 반경을 고려하여 50 mm로 결정하였다.

표 2 고온초전도 마그넷의 사양

Table 2 Specification of the HTS BSCCO magnet

내반경	50 mm
외반경	114 mm
높이	100 mm
팬케이크의 수	10
총 권선 수	930
전체 권선 길이	254 m

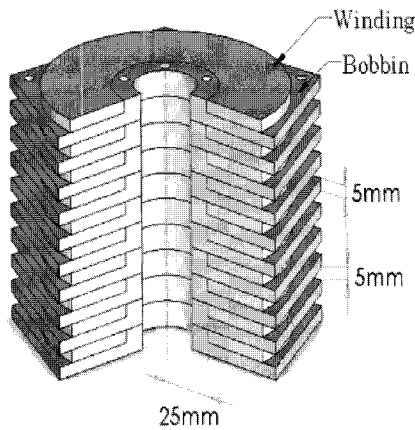


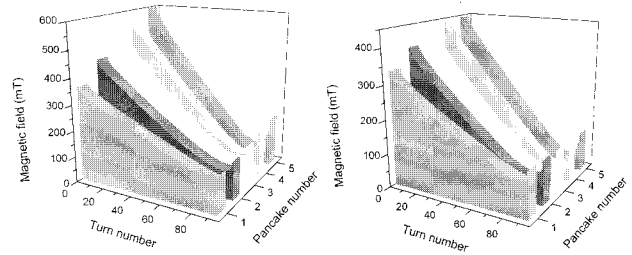
그림 6 고온초전도 마그넷의 구조

Fig. 6 Configuration of the HTS magnet

고온초전도 마그넷의 여자 방법을 달리하면서 중심자장이 최대가 되는 팬케이크 권선의 임계전류를 위에서 제시한 최적화 방법으로 계산하였다. 단일전원으로 여자된 마그넷의 경우 최대 수직자장의 영향을 받는 최외각 팬케이크 권선에 의해 마그넷의 운전전류가 결정되었으며, 그 값은 44.5 A 이고 그 때의 중심자장은 0.408 T 이었다. 반면에 각 팬케이크 권선에 별도전원으로 여자된 마그넷의 경우 각 팬케이크 권선의 운전전류는 맨 아래 팬케이크 권선부터 37.7, 44.4, 51.8, 61.2, 69.3 A 이었으며 그 때의 중심자장은 0.524 T로 각각의 팬케이크 권선을 별도전원으로 여자시킨 결과 단일전원으로 여자된 마그넷보다 중심자장이 약 28.4% 증가하였다.

그림 7과 그림 8은 마그넷의 각 팬케이크 권선이 만들어 내는 자장의 크기와 방향을 위치에 따라 나타낸 것이다. 그림 7에서 팬케이크 권선의 번호는 마그넷에 적층된 팬케이크 권선의 번호로 1번이 가장 아래쪽에 위치한 팬케이크 권선의 번호이며, 턴 번호는 총 93턴이 감긴 각 팬케이크 권선에서 턴의 위치를 나타낸 것으로 1번이 가장 안쪽 턴이다. 그래프의 z 축은 마그넷의 각 위치에 인가되는 자장의 크기를 나타내며 그래프에서 알 수 있듯이 자장의 크기는 마그넷의 중심에 위치한 5번 팬케이크 권선의 가장 안쪽에 위치한 첫 번째 턴에 크기가 가장 큰 자장이 인가된다. 이는 자장의 각도는 고려하지 않고 크기만 표시한 것으로 마그넷의 중심에 가까운 위치에 있는 초전도 선에 인가되는 수평자장

이 가장 크기 때문이다. 자장이 가장 높은 5번째 팬케이크 권선의 첫 번째 턴에 인가되는 자장은 별도전원으로 여자한 경우가 596 mT로 단일전원으로 여자한 경우에 발생한 445 mT 보다 컸다.

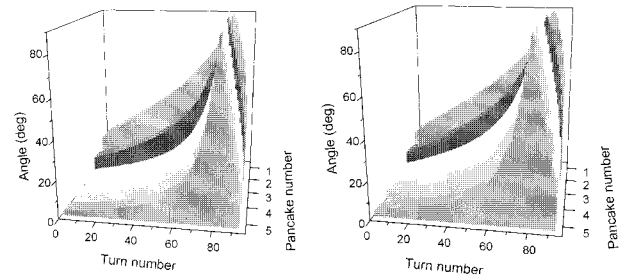


(a) 단일전원

(b) 별도전원

그림 7 HTS 마그넷의 자장 분포 (a) 단일전원, (b) 별도전원  
Fig. 7 Magnetic field of the HTS magnet (a) single power excitation, (b) multiple power excitation

그림 8은 마그넷의 각 위치에 인가되는 자장의 방향의 분포를 나타내는 것으로 모든 팬케이크 권선의 80번째 턴이 위치한 근처에서 초전도선의 임계전류에 큰 영향을 미치는 수직방향의 자장이 인가되는 것을 알 수 있다. 이러한 이유는 마그넷이 그림 1에서와 같은 자장 분포를 갖기 때문이다.



(a) 단일전원

(b) 별도전원

그림 8 HTS 마그넷의 각도 분포 (a) 단일전원, (b) 별도전원  
Fig. 8 Angle of the HTS magnet (a) single power excitation, (b) multiple power excitation

각 턴에서의 임계전류는 그림 5의  $I_C$ -B 관계를 이용하여 그림 9에 나타내었다. 그림 9에서 알 수 있듯이 최외각에 위치한 첫 번째 팬케이크 권선에서 임계전류가 가장 낮은 턴이 존재하며, 가장 낮은 임계전류는 단일전원의 경우 41번째 턴에서 40.6 A, 별도전원의 경우 39번째 턴에서 34.0 A였다.

그림 10은 HTS 마그넷의 전계 분포를 나타낸 것이다. 단일전원의 경우 자장의 영향을 가장 많이 받는 최외각에 위치한 첫 번째 팬케이크 권선에서만 비교적 큰 전계가 발생했으며 나머지 팬케이크 권선에서는 거의 전계가 발생하지 않았다. 이에 반해서 별도전원의 경우 자장의 영향을 받은 거의 모든 팬케이크 권선에서 전계가 발생했다. 최대 전계는 단일전원의 경우 첫 번째 팬케이크 권선의 41번째 턴에서 발생했으며 그 크기는 1.69  $\mu\text{V}/\text{cm}$ 였다. 반면 별도전원의 경우 최대 전계는 2.37  $\mu\text{V}/\text{cm}$ 로 가운데에 위치한 다섯 번째 팬케이크 권선의 가장 안쪽 턴에서 발생하였다.

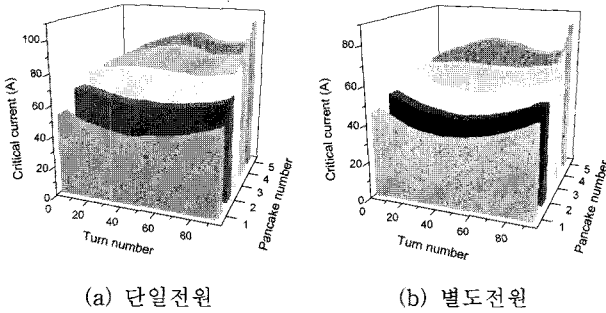


그림 9 HTS 마그넷의 임계전류 (a) 단일전원, (b) 별도전원  
 Fig. 9 Critical current of the HTS magnet (a) single power excitation, (b) multiple power excitation

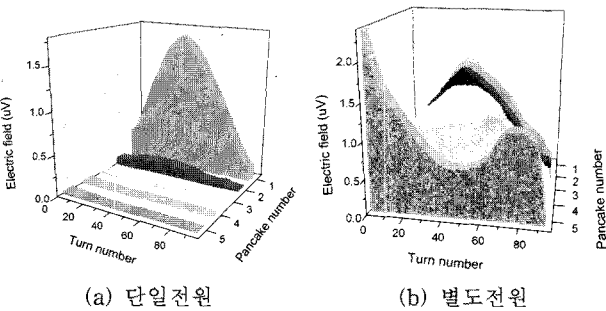


그림 10 HTS 마그넷의 전계 분포 (a) 단일전원, (b) 별도전원  
 Fig. 10 Electric field of the HTS magnet (a) single power excitation, (b) multiple power excitation

단일전원으로 여자한 경우, 최외각에 위치한 첫 번째 팬케이크 권선에서 발생한 전압은 임계전압인 2.54 mV이었다. 별도전원으로 여자한 경우 모든 팬케이크 권선에서 발생한 전압은 임계전압인 2.54 mV이었으며, 이는 모든 권선들이 임계전류로 통전되고 있음을 의미한다.

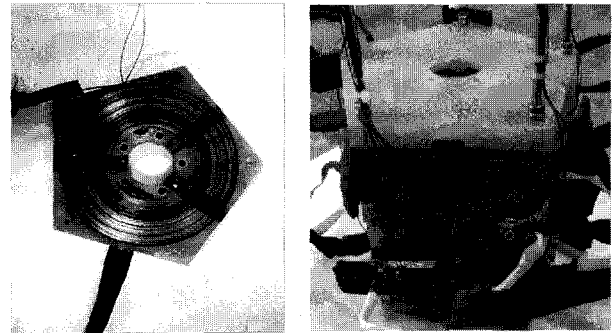
#### 4. 마그넷의 특성 측정

그림 11은 제작된 팬케이크 권선형 고온초전도 마그넷이다. 제작된 팬케이크 권선은 극저온에서 수축률이 작은 강화 유리 합성섬유(GFRP)로 만든 보빈 위에 스테인레스강으로 보강된 BSCCO-2223 선재를 두께가 0.06 mm인 필름으로 절연하여 93턴씩 권선하였다. 제작된 팬케이크 권선은 그림 11(a)와 같고 총 10개를 만들어서 그림 11(b)와 같이 적층하여 마그넷을 제작하였다.

팬케이크 권선 10개로 구성된 마그넷을 여자하기 위해 별도의 전원 5개를 사용하였으며 홀센서를 설치하여 마그넷의 중심자장과 팬케이크 권선의 수직자장을 측정하였다.

단일전원을 사용하였을 때에 각각의 팬케이크 권선에서의 임계전류를 측정된 결과는 그림 12와 같다. 맨 위에 위치한 팬케이크 권선(No. 10)의 탭 전압이 가장 컸으며, 맨 아래 위치한 팬케이크 권선(No. 1)에서 발생한 탭 전압, No. 2, No. 9 팬케이크 권선 순으로 발생한 탭 전압이 컸다. 이는 최외각 팬케이크 권선에 임계전류가 인가되면 수직자장의 영향이 가장 작은 가운데 위치한 팬케이크 권선에는 임계전

류보다 훨씬 낮은 전류가 흐르고 있음을 의미한다.



(a) 팬케이크 권선 (b) 고온초전도 마그넷

그림 11 고온초전도 마그넷  
 Fig. 11 The HTS magnet (a) pancake winding, (b) magnet

단일전원과 별도전원으로 팬케이크 권선에 전원을 인가할 경우, 각각의 팬케이크 권선에서의 임계전류를 그림 13에 나타내었으며 계산된 결과와 비교하였다. 모든 팬케이크 권선의 전류가 임계전류가 가장 낮은 최외각 팬케이크 권선에 의해서 결정되는 단일전원을 사용한 경우는 계산된 전류가 44.5 A이고 측정된 전류는 46.5 A이었다. 각각의 팬케이크 권선의 전류를 서로 달리 할 수 있는 별도전원을 사용한 경우에 마그넷의 자장분포가 상하대칭이기 때문에 상하대칭 위치에 있는 팬케이크 권선 쌍의 임계전류는 동일하다. 그림 13에서 별도전원을 사용한 경우에 각 팬케이크 권선 쌍의 임계전류 값을 Multi #1 ~ Multi #5로 나타내었다.

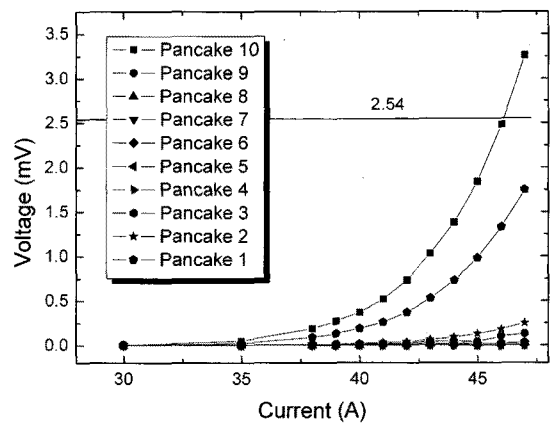


그림 12 단일전원인 경우의 전압-전류 관계  
 Fig. 12 V-I relation of single power excitation

별도전원을 사용한 경우에 최외각에 위치한 팬케이크 권선 쌍인 Multi #1의 경우에 계산치가 37.7 A, 측정치가 38.0 A로 비교적 일치하였고 가장 안쪽에 위치한 권선 쌍인 Multi #5의 경우에는 계산치가 69.3 A, 측정치가 72.0 A로 측정치가 3.90% 컸다. 위치별로 계산치와 측정치의 비율은 약간 달라 가장 차이가 적은 팬케이크 권선은 최외각에 위치한 Multi #1으로 측정치가 0.80% 컸고, 가장 차이가 큰 팬케이크 권선은 가장 바깥에서 두 번째에 위치한 Multi #2로 측정치가 5.86% 컸다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이

모든 팬케이크 권선에서 계산된 임계전류보다 측정된 임계 전류가 크게 나타났다.

### 5. 결 론

고온초전도 마그넷에서는 위치마다 고온초전도선에 인가 되는 자장의 크기와 방향이 달라 고온초전도선에 인가되는 자장을 정의하기가 어렵다. 본 연구에서는 고온초전도 선재에 인가되는 자계를 산정하는 새로운 방법을 제시했다. 본 연구에서 제시한 방법과 E-J 관계를 이용해서 10개의 팬케이크 권선으로 구성된 BSCCO 마그넷의 임계전류를 산정하였으며, 이 마그넷을 제작하여 임계전류를 측정하여 본 연구에서 제시한 방법의 타당성을 검증했다.

측정결과에 의하면 5개 팬케이크 권선의 임계전류는 측정된 값이 계산값에 비해 0.80%에서 5.86% 커서 두 값이 비교적 일치하였다. HTS 마그넷의 중심자장은 별도전원을 여자할 경우 단일전원으로 여자할 때보다 32.9% 증가하여 별도전원의 사용하면 중심자장을 상당히 높일 수 있다는 것을 확인하였다. 별도전원을 사용한 경우에 중심자장을 측정된 결과는 계산값 보다 10.3% 컸다.

본 연구에서 제시한 고온초전도 마그넷을 권선하는 데에 사용된 고온초전도선에 인가되는 자장을 정의하는 방법을 사용하면 팬케이크 권선으로 구성된 고온초전도 마그넷의 임계전류를 비교적 정확하게 산정할 수 있는 것으로 밝혀졌다.

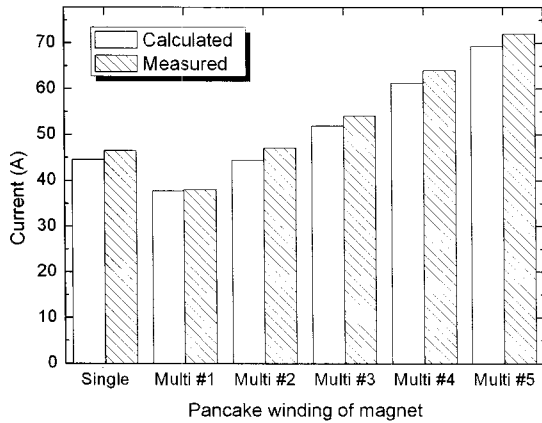


그림 13 마그넷의 임계전류  
Fig. 13 Critical current of the HTS magnet

고온초전도 마그넷을 단일전원으로 여자한 경우와 별도전원으로 여자한 경우에 대한 마그넷에서의 중심자장을 측정된 결과가 그림 14이다. 측정된 중심자장과 계산된 중심자장을 비교한 결과 단일전원으로 여자된 마그넷의 경우 측정된 중심자장은 0.435 T이고 계산된 중심자장은 0.408 T로 측정된 값은 계산값에 비해 6.6% 컸다. 모든 팬케이크 권선 임계전류의 측정값이 계산값 보다 컸기 때문에 중심자장도 측정값이 계산값 보다 컸다. 별도전원으로 여자된 마그넷의 경우에는 측정된 중심자장이 0.578 T이고 계산된 중심자장은 0.524 T로 측정값이 계산값 보다 10.3% 컸다.

단일전원으로 여자한 경우와 별도전원으로 여자한 경우의 중심자장을 비교하면 단일전원으로 여자한 경우의 측정치가 0.435 T이고 별도전원으로 여자한 경우는 0.578 T로 별도전원으로 여자한 경우가 32.9% 커서 별도전원으로 여자하면 중심자장을 상당히 높일 수 있다는 것을 알 수 있다.

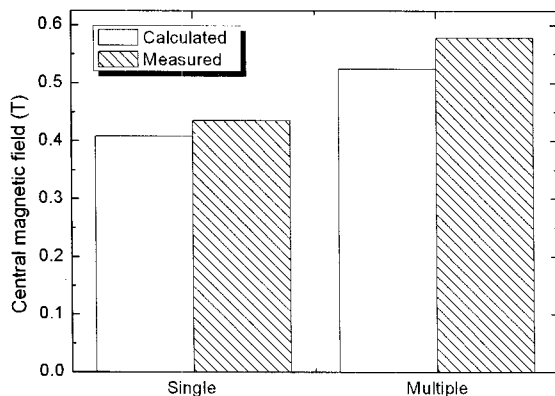


그림 14 마그넷의 중심자장  
Fig. 14 Central magnetic field of the HTS magnet

### 감사의 글

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

### 참 고 문 헌

- [1] M. Daumling and R. Flukiger, "Factors determining the magnetic field generated by a solenoid made with a superconductor having critical current anisotropy," *Cryogenics*, Vol. 35, pp. 867-780, 1995.
- [2] J. Pitel, P. Kovac and I. Husek, "Calculation of the critical currents of Bi(2223)/Ag tapes and coils with reduced anisotropy in  $I_c(B)$  characteristics - effect of different proportional representations of the filaments oriented parallel and perpendicularly to the tape surface," *Physica C*, vol. 300, pp. 130-140, 2000.
- [3] Y. Adanny, et al., "Calculated E-I characteristics of HTS pancakes and coil exposed to inhomogeneous magnetic fields," *Journal of Physics, Conference Series*, vol. 43, pp. 1068-1071, 2006.
- [4] K. Lee et al., "Properties of an HTS Magnet With Pancake Windings Excited by Multiple Power Sources," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 18, no. 2, pp. 1533-1536, 2008.
- [5] M. Kang et al., "Design method of a high field HTS magnet consisting of pancake windings having different current in each pancake windings," *IEEE*

*Trans. Appl. Supercond.*, vol. 18, no. 2, pp. 1537-1540, 2008.

- [6] M. Kasper, "Shape Optimization by Evolution Strategy," *IEEE Trans. on Magnetics*, vol. 28, no.2, pp. 1556-1559, 1992.
- [7] T. Hayashi et al., "Numerical calculation of magnetization losses in single Bi-2223 tape with anisotropic transport properties by 2D-FEM directly analyzing the field distribution," *Physica C*, vol. 412-414, no. 2, pp. 1129-1133, 2004.

## 저 자 소 개



### 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



### 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



### 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 : heejeon@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