

# 별도전원으로 여자되는 팬케이크 권선형 고온초전도 마그넷의 제작과 특성 시험

論 文  
57-3-8

## Fabrication and Test Results of an HTS Magnet with Pancake Windings Excited by Multiple Power Sources

李光淵\* · 姜明勳\*\* · 李鎔奭\*\*\* · 車貴守† · 李喜俊§  
(K. Y. Lee · K. M. Hun · Y. S. Lee · G. S. Cha · H. J. Lee)

**Abstract** -The central magnetic field of an HTS magnet consisting of pancake windings can be increased if the magnet is excited by multiple power sources. Multiple power sources enable all pancake windings to conduct their critical currents. The HTS magnet consisting of pancake windings was excited by separate power sources in this paper. Critical currents of each pancake winding were determined by using optimization technique. Fabrication of the BSCCO magnet consisting of 10 pancake windings is described and test results of the BSCCO magnet are given. Central magnetic field and perpendicular magnetic field of the magnet excited by multiple power sources were compared with those of the magnet excited by a single power source.

**Key Words** : HTS magnet, Insert coil, Pancake winding, Multiple power sources

### 1. 서 론

일반도체를 사용하여 마그넷을 제작하면 전류밀도가 낮기 때문에 자장을 높이는 것은 어렵다. 반면에 초전도 선재를 이용하여 마그넷을 제작할 때에는 초전도선의 전류밀도는 높지만, 초전도선에 외부자장이 인가되면 임계전류가 감소하기 때문에 흐를 수 있는 전류가 제한된다[1-3]. 고온초전도 선재를 사용하여 고자장 마그넷을 제작할 때 보통 팬케이크 권선으로 제작하여 단일 전원을 사용해 모든 팬케이크 권선에 전원을 인가하는데, 이 경우 팬케이크 권선 중에서 임계전류가 가장 낮은, 맨 위 부분과 아래 부분에 위치한 팬케이크 권선에서의 임계전류를 고온초전도 마그넷의 운전 전류로 결정하여야 한다. 그러므로 가장 위 부분과 아래 부분에 위치한 팬케이크 권선을 제외한 다른 팬케이크 권선에서는 인가할 수 있는 전류의 용량이 남아 있어도 전류를 인가할 수 없는 문제가 발생한다.

이러한 문제를 해결하는 방법으로 각각의 팬케이크 권선에 별도의 전원을 사용해 각각의 팬케이크 권선에 알맞은 전류를 인가시키면 고온초전도 마그넷이 발생하는 자장을 증가시킬 수 있다[4].

본 논문에서는 팬케이크 권선으로 구성된 고온초전도 마그넷을 제작하여 별도전원을 사용해서 여자했다. 별도전원

을 사용해서 팬케이크 권선을 여자했으므로 모든 팬케이크 권선에 임계전류를 통전시킬 수 있었고 각각의 팬케이크 권선에 인가시킬 전류의 크기에 대해서 수학적인 규명이 잘 되어 있고 알고리즘이 간단하면서도 수렴속도도 빠른 편인 (1+1) 진화론적 방법을 사용해서 최적설계를 수행했다.

BSCCO-2223 고온초전도 선재를 사용하여 10개의 팬케이크 권선을 제작하였으며, 제작한 고온초전도 마그넷이 발생하는 중심자장의 크기와 수직자장의 크기를 단일전원을 인가하였을 경우와 별도전원을 인가하였을 경우에 대해 비교하였다.

### 2. 고온초전도 마그넷 설계

고온초전도 마그넷에 전원을 인가하는 방법으로는 단일전원을 인가하는 방법과 별도전원을 인가하는 방법이 있다. 그림 1은 각각의 팬케이크 권선을 단일전원으로 여자하는 경우와 별도전원으로 여자하는 경우를 보인 것이다. 별도전원을 인가하는 경우 그림 1.b)에서와 같이 팬케이크 권선을 두 개씩 직렬로 연결하여(1번 권선과 10번 권선 등) 전원을 인가한다. 맨 위쪽 팬케이크 권선과 대칭적인 위치에 있는 맨 아래쪽 팬케이크 권선의 자력선 분포가 동일하고, 수직자장의 세기도 동일하기 때문에 10개 팬케이크 권선의 경우에는 5개의 전원을 사용하면 된다.

테이프 형태의 BSCCO-2223 고온초전도 선재는 외부자장이 가해지면 임계전류 값이 감소하게 된다. 특히 외부자장이 고온초전도 선재에 수직 방향으로 ( $B_{\perp}$ ) 인가되면 수평 방향으로 ( $B_{\parallel}$ ) 인가될 때 보다 임계전류가 큰 폭으로 감소한다. 따라서, 임의의 방향으로 가해진 자장에 대한 초전도 선재의 임계전류는 수직방향 자장성분의 크기에 의해 결정된다.

\* 正 會 員 : 順天鄉大 大學院 電氣工學科 博士課程

\*\* 學生會員 : 順天鄉大 大學院 電氣通信工學科 碩士課程

\*\*\* 學生會員 : 順天鄉大 大學院 電氣通信工學科 碩士課程

§ 正 會 員 : 順天鄉大 大學院 契約教授, 博士

† 교신저자, 正會員 : 順天鄉大 電氣通信工學科, 教授, 博士

E-mail : gsoocha@sch.ac.kr

接受日字 : 2007年 11月 17日

最終完了 : 2008年 1月 9日

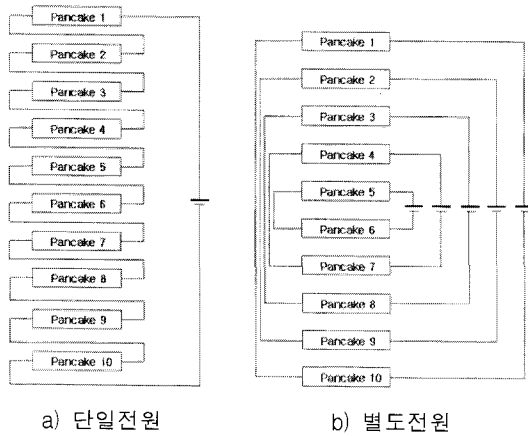


그림 1 고온초전도 마그넷에 전원인 인가하는 방법  
 Fig. 1 Two excitation methods of HTS magnet  
 (a) Single power excitation  
 (b) Multiple power excitation

각 팬케이크 권선에 흐를 수 있는 임계전류는 각 팬케이크 권선에 인가되는 수직자장의 최대치에 의해서 결정된다. 따라서 모든 팬케이크 권선을 직렬로 연결해서 단일전원으로 여자하면 모든 팬케이크 권선에 흐를 수 있는 임계전류는 수직자장의 세기가 가장 큰 최외각 팬케이크 권선의 임계전류가 된다. 가운데 부분에 위치한 팬케이크 권선에 인가되는 수직자장의 세기는 최외각 팬케이크 권선보다 낮기 때문에 가운데에 위치한 팬케이크 권선에는 임계전류 이하의 전류가 흐르게 되어 팬케이크 권선의 효율이 낮아진다.

팬케이크 권선의 임계전류를 결정하는 데에 가장 중요한 것은 외부에서 인가되는 최대 자계의 세기를 결정하는 것으로, 최대 자계는 자신의 팬케이크 권선에 흐르는 전류에 영향을 받는 것은 물론이고 다른 팬케이크 권선에 흐르는 전류에 의해서도 영향을 받는다. 팬케이크 권선 내에서 자장의 세기는 위치마다 다를 뿐만 아니라 한 가닥의 BSCCO-2223 선재 안에서도 위치마다 다르다. 이 논문에서는 BSCCO-2223 선재 한 가닥을 10개 부분으로 나누어서 인가되는 자장의 평균값을 BSCCO-2223 선재의 자장으로 정했고, 팬케이크 권선에서의 최대 자장은 위에서와 같은 방법으로 구한 BSCCO-2223 선재에서의 자장 중에서 가장 큰 값으로 정했다. 식 (1)은 최대 수직 자장을 구하는 방법을 표시한 것으로 식 (1)에서  $n$ 은 BSCCO-2223 선재를 나눈 수이다.

$$B_{\perp} = \sum_{i=1}^n B_{\perp,i} / n \tag{1}$$

사용될 BSCCO 고온초전도선의  $I_c - B$  특성을 미리 측정하여 식 (1)에서 구한 수직 자장에 해당하는 전류를 각각의 팬케이크 권선에서의 임계전류로 결정하였다.

각각의 팬케이크 권선의 임계전류는 서로 연관 되어 있기 때문에, 고온초전도 마그넷의 중심자장 크기를 최대로 하

는, 각각의 팬케이크 권선에서의 임계전류를 계산하기 위해서는 비결정론적 최적화 기법의 일종인 진화론적 방법을 사용하였다[5].

팬케이크 권선에서 임계전류의 계산과 제작된 팬케이크 권선 시 사용된 BSCCO-2223 선재의 사양은 표 1과 같다. 사용된 고온초전도선의 임계전류는 126 A, 폭과 두께는 각각 4.4 mm와 0.285 mm이었다. 임계전류의 판단기준으로는  $1 \mu\text{V}/\text{cm}$ 를 사용하였다. 임계전류가 5% 감소하는 구부림 직경은 38 mm이었다.

표 1 BSCCO-2223 선재의 사양

Table 1 Specifications of BSCCO-2223 wire

Critical current	126A at 77K, 0T
Thickness	0.285 mm
Width	4.4 mm
Tensile stress (Max)	250 MPa
Bend diameter (Min)	38 mm

고온초전도 마그넷을 설계할 때 표 1의 고온초전도 선재의 사양을 사용하여 10개의 팬케이크 권선을 설계하였으며 각각의 팬케이크 권선에 93턴씩 권선하였다. 팬케이크 권선과 팬케이크 권선 사이에는 5 mm 씩의 절연 간격을 두었고, 권선의 내경은 50 mm로 권선의 구부림 직경을 고려하여 결정하였다. 표 2는 고온초전도 마그넷의 설계 사양이다.

표 2 고온초전도 마그넷 사양

Table 2 Specifications of HTS magnet

Inner diameter	50 mm
Outer diameter	114 mm
Height	100 mm
Number of pancake windings	10
Total number of turns	930
Total length of wire	254 m

그림 2는 고온초전도 마그넷에서 팬케이크 권선의 배치로서 설계된 마그넷의 자계의 크기를 측정하기 위해 2개의 홀센서를 사용했다. 최대 수직자계를 측정하기 위해 수직방향으로 최대 자장이 인가되는 맨 위부분의 팬케이크 권선에 홀센서를 부착하였고, 중심 자장을 측정하기 위해 마그넷 중심에 홀센서를 부착하였다.

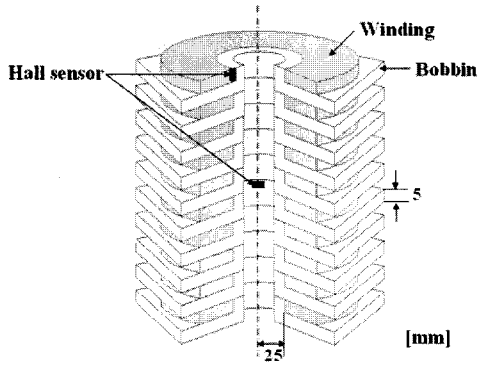


그림 2 고온초전도마그넷 배치도  
Fig. 2 Configuration of the HTS magnet

설계된 고온초전도 마그넷에 단일전원을 인가할 경우와 별도전원을 인가할 경우 팬케이크 권선에서의 임계전류와 중심부에서의 자계의 세기를 계산한 결과는 표 3과 같다. 팬케이크 권선의 배열순서가 맨 위 부분 팬케이크 권선과 맨 아래 부분의 팬케이크 권선으로 되어 있는 것은, 마그넷에서 자장의 분포가 대칭적으로 되어 있기 때문에 맨 위 부분의 팬케이크 권선에서의 임계전류(I1)와 맨 아래 부분의 팬케이크 권선에서의 임계전류(I10)가 같고, 또한 2번째 팬케이크 권선에의 임계전류(I2)와 9번째 팬케이크 권선에의 임계전류(I9)가 같다. 고온초전도 마그넷에서, 맨 위 부분의 팬케이크 권선과 맨 아래 부분의 팬케이크 권선에서 중심 팬케이크 권선으로 갈수록 임계전류가 증가하는 것은 팬케이크 권선에 인가되는 외부 자장이 감소하기 때문이다.

단일전원과 별도전원을 사용할 경우 전체의 기자력(MMF)은 각각 19,437 AT 및 23,455 AT이었다. 별도전원을 사용할 경우 단일전원을 사용할 경우보다 기자력이 더 컸는데 이로부터 마그넷 중심부에서의 자장의 크기가 별도전원을 사용할 경우 더 클 것이라는 것을 예상할 수 있다. 마그넷 중심에서의 자계의 세기(B0)는 단일전원을 사용할 경우 0.39 T이었고, 별도전원을 사용할 경우 0.51 T이었다. 마그넷 중심에서의 자계의 세기는 별도전원을 사용할 때가 단일전원을 사용할 경우보다 22% 증가하는 것을 알 수 있다.

표 3 각 팬케이크 권선의 임계전류와 자계의 세기  
Table 3 Critical Current and Central Flux Density

	Pancake Number	Critical Current (A)	Central Flux density (T)
단일 전원	1 - 10	41.8	0.39
	1, 10	35.3	
별도 전원	2, 9	42.3	0.50
	3, 8	50.9	
	4, 7	58.0	
	5, 6	65.7	

### 3. 고온초전도 마그넷 제작

팬케이크 권선에 사용한 고온초전도 선재는 스테인레스강으로 보강된 BSCCO-2223 선재를 사용하였으며, 권선 시 사용한 보빈은 극저온에서 수축률이 작은 강화 유리 합성 섬유(GFRP)를 사용하여 제작하였다. 고온초전도 선재의 한쪽 면에 두께가 0.06 mm인 캡톤 필름을 부착시켜 선재의 턴과 턴 사이를 절연하였다.

그림 3.a)는 권선에 사용할 보빈의 모양으로 보빈과 고온초전도 선재 사이에 냉각 채널을 만들어 위 보빈과 아래 보빈사이에서 액체질소 통로를 설치하였고, 팬케이크 권선과의 연결을 접속단자를 이용하여 연결을 용이하게 하기 위해 5각형 구조로 설계하였다. 그림 3.b)는 10개의 팬케이크 권선을 배치한 구조로서 팬케이크 권선과 팬케이크 권선을 연결하기 위한 단자가 설치된 그림이다. 팬케이크 권선과 팬케이크 권선을 연결하기 위한 단자는 구리로 제작되었으며 연결 시 사용된 선은 상전도선인 구리를 사용하였다. 권선된 고온초전도 선재가 전하력을 받아 움직이는 것을 방지하기 위해 각각의 보빈에 고온초전도 선재를 권선할 때 15 N의 장력을 인가하면서 권선하였다.

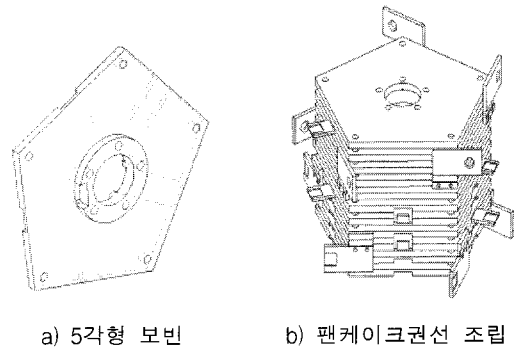
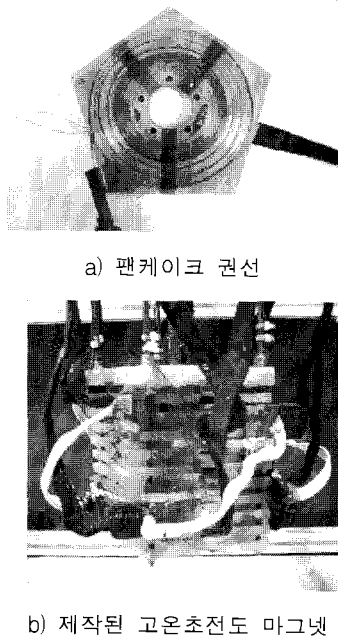


그림 3 보빈과 팬케이크권선의 조립도  
Fig. 3 Bobbin and assembled pancake windings  
(a) Pentagonal bobbin  
(b) Assembled pancake windings

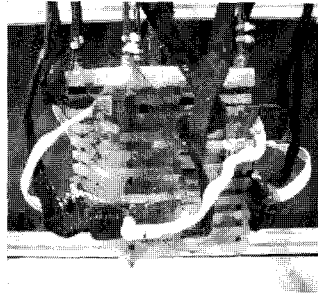
그림 4는 고온초전도 선재로 권선한 보빈과 10개의 팬케이크를 조립한 고온초전도 마그넷을 제작한 그림이다. 각각의 팬케이크에는 고온초전도 선재를 93턴씩 권선하였으며 하나의 팬케이크 권선에 사용한 선재의 길이는 25.4 m이다. 각각의 팬케이크 권선에는 전압 탭을 설치하여 인가되는 전압을 측정하였다. 위쪽 팬케이크 권선과 대칭적인 위치에 있는 아래쪽 팬케이크 권선의 자력선 분포와 수직자장의 세기는 동일하기 때문에 5개의 별도 전원을 사용하여 팬케이크 권선에 전류를 인가하였다.

### 4. 고온초전도 마그넷 실험 결과

제작된 고온초전도 마그넷의 특성 실험을 위해 액체질소(LN<sub>2</sub>)를 사용하였다. 그림 5는 제작된 고온초전도 마그넷



a) 팬케이크 권선



b) 제작된 고온초전도 마그넷

그림 4 고온초전도선재를 사용하여 권선한 보빈과 제작된 고온초전도 마그넷

Fig. 4 Pancake winding and HTS magnet  
(a) Fabricated pancake winding  
(b) Fabricated HTS magnet

의 특성 실험을 하기 위한 회로도이다. 10개로 구성된 팬케이크 권선에 전원을 인가하기 위해 별도의 전원을 5개 사용하였으며, 디지털 레코더를 설치하여 전류 및 전압을 측정하였다. 또한, 그림 2와 같이 홀센서를 2개 설치하여 맨 위 팬케이크 권선에서의 수직자장과 마그넷 중심에서의 자장을 측정하였다.

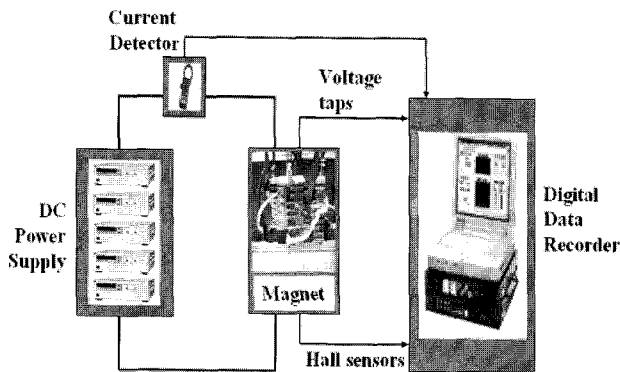


그림 5 측정 회로도

Fig. 5 Circuit for measurement

단일전원을 사용하여 10개의 팬케이크 권선에 전류를 인가하였을 경우 팬케이크 권선에서 발생하는 탭 전압을 측정하는 것이 그림 6이다. 맨 위에 설치된 팬케이크 권선의(No.

1) 탭 전압이 가장 컸으며, 맨 아래에 설치된 팬케이크 권선에서(No. 10) 발생하는 탭 전압이 두 번째로 컸다. 그리고 9 번째 팬케이크 권선에서 발생하는 탭 전압이 3번째로 컸으며 2번째 팬케이크 권선에서 발생하는 탭 전압이 4번째로 컸다. 전원을 계속 인가할 때 맨 위에 설치된 팬케이크 권선에서 고온초전도 성질을 유지하기 위한 임계전류는 46.5 A이었다. 이는 단일전원으로 모든 팬케이크 권선을 여자할 경우 인가할 수 있는 최대 전류가 46.5 A라는 것을 의미하는 것으로, 팬케이크 권선에 46.5 A가 인가되면 수직자장이 가장 작은 가운데에 위치한 팬케이크 권선에는 임계전류보다 훨씬 낮은 전류가 흐르고 있는 것을 알 수 있다.

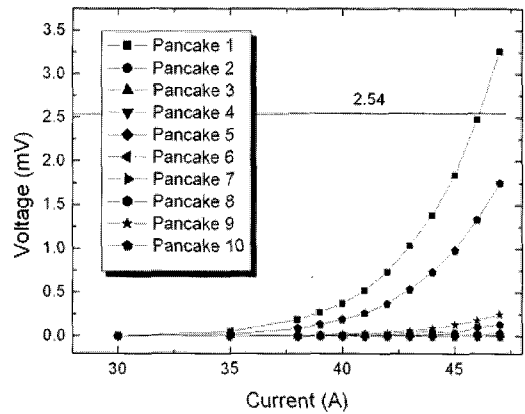


그림 6 단일전원을 사용할 경우 팬케이크권선에서의 탭전압  
Fig. 6 Tap voltage of pancake windings excited by a single power

단일전원과 별도전원으로 팬케이크 권선에 전원을 인가할 경우, 각각의 팬케이크 권선에서의 임계전류를 그림 7에 나타내었다. 그림 7에서 단일 전원을 사용한 경우의 임계전류를 single로 표현하여 계산한 결과와 측정된 결과를 나타내었으며, 별도전원을 사용하였을 경우의 임계전류값을 각 팬케이크 권선에 대해서 multi 1에서부터 multi 10까지 나타내었다.

별도 전원으로 마그넷에 전원을 인가하는 방법은, 마그넷에서 자장의 분포가 대칭적으로 되어 있기 때문에 맨 위 부분의 팬케이크 권선에서의 임계전류(I1)와 맨 아래 부분의 팬케이크 권선에서의 임계전류(I10)가 같고, 또한 2번째 팬케이크 권선에서의 임계전류(I2)와 9번째 팬케이크 권선에서의 임계전류(I9)가 같으므로, 5개의 독립전원을 사용하여 순차적으로 각각의 팬케이크 권선에 전원을 인가하였다.

그림 7에서 볼 수 있는 바와 같이 팬케이크 권선의 실제 임계전류는 계산된 임계전류보다 증가했다. 그 이유는 계산시 사용된 수직자장과 실제 수직자장의 차이에 의한 것으로, 팬케이크 권선에서의 수직자장은 BSCCO-2223 선재의 평균 수직자장을 사용했다. 실험 결과에 의하면 팬케이크 권선의 임계전류를 계산할 때에 BSCCO-2223 선재에서의 평균 수직자장보다 더 낮은 수직자장을 사용하여야 함을 알 수 있다.

단일전원을 인가한 경우와 별도전원으로 인가할 경우에 대한 기차력을 비교한 결과 마그넷에 별도전원으로 인가한

경우가 단일 전원으로 인가한 경우보다 기자력이 18% 컸다. 마그넷을 별도전원으로 인가할 경우의 실제 기자력은 25,575 AT으로 같은 경우에 대해 계산한 결과 보다 9% 증가하였다.

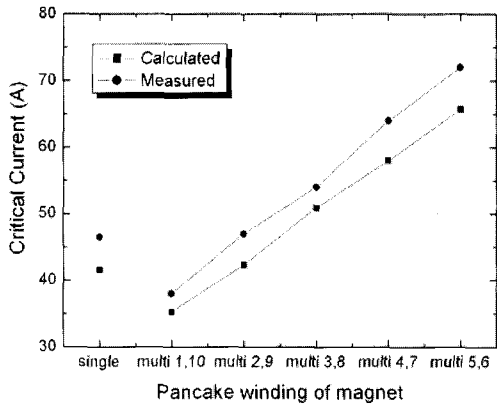


그림 7 고온초전도 마그넷의 임계전류  
Fig. 7 Critical current of HTS magnet

고온초전도 마그넷에 단일전원으로 인가한 경우와 별도전원으로 인가할 경우에 대한 마그넷에서의 중심자장을 측정 한 결과가 그림 8이다. 고온초전도 마그넷에서의 중심자장을 측정 한 결과 단일전원을 인가할 경우는 0.44 T이었고, 별도전원으로 인가할 경우는 0.58 T이었다. 고온초전도 마그넷에 별도전원을 인가할 경우 단일전원으로 인가할 때보다 중심자장이 32% 증가하였다.

별도전원으로 고온초전도 마그넷을 여자할 경우의 중심자장은 측정값이 계산값보다 13% 더 컸는데 그 이유는 계산할 때 사용된 전류보다 측정할 때 더 큰 전류가 인가되었기 때문이다.

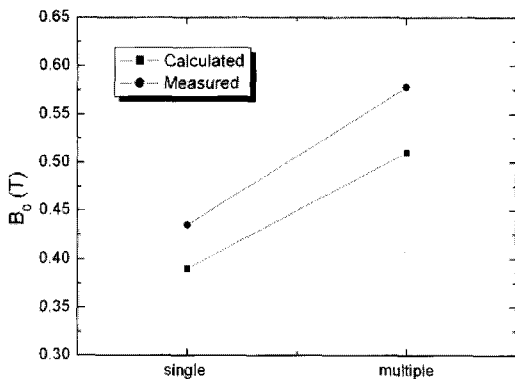


그림 8 고온초전도 마그넷의 중심 자장의 세기  
Fig. 8 Central flux density of HTS magnet

그림 9는 맨 위에 설치된 팬케이크 권선에서의 수직 자장을 측정 한 결과이다. 팬케이크 권선에 단일전원을 인가할 경우 수직 자계는 0.12 T이었고, 별도전원을 인가할 경우 수직자계는 0.13 T이었다. 두 경우 모두 측정된 결과가 계산된 결과보다 컸다.

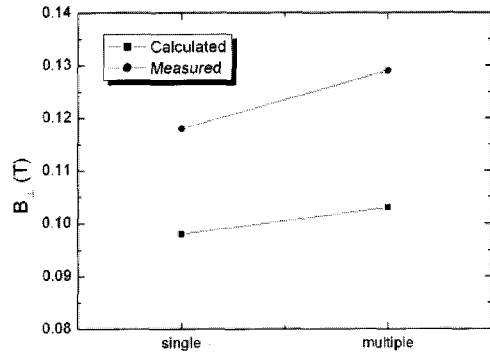


그림 9 고온초전도 마그넷의 수직자계의 세기  
Fig. 9 Perpendicular flux density of HTS magnet

그림 10은 고온초전도 마그넷의 축 방향을 따라 중심자계의 세기를 측정 한 결과이다. 고온초전도 마그넷의 중심부 (z=0 mm)로부터 z=40 mm까지 위치를 변화시키면서 중심자장의 세기를 측정 한 결과 단일전원인 경우 중심자장의 변화는 31.5%이였으며, 별도전원인 경우 중심자장의 변화는 35.7%이었다. 단일전원보다 별도전원을 사용할 경우 중심자장의 변화가 더 심하였는데 그 이유는 별도전원을 사용할 때 기자력이 안쪽에 위치한 팬케이크 권선으로 집중되기 때문이다.

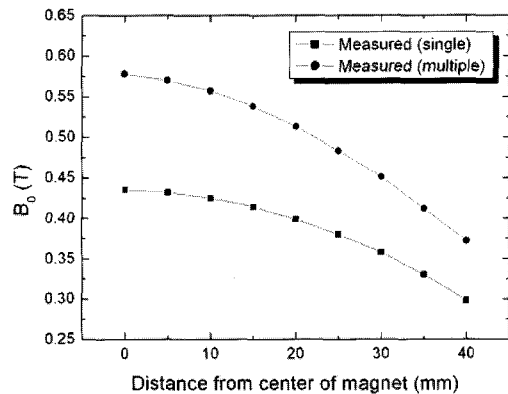


그림 10 축 방향을 따라 측정 한 중심자계의 세기  
Fig. 10 Variations of flux density along axis

### 5. 결 론

팬케이크 권선으로 구성된 기존의 고온초전도 마그넷이 단일전원으로 여자되는 데에 비해서 본 연구에서는 각각의 팬케이크 권선을 별도전원을 사용하여 여자하였다. 별도전원을 이용해 팬케이크 권선을 여자한 결과 모든 팬케이크 권선에 임계전류를 통전할 수 있었다. 제작된 고온초전도 마그넷에서 중심자장의 크기를 측정 한 결과 단일전원을 사용하여 여자한 경우보다 별도전원을 사용하여 여자한 경우가 중심자장이 32% 증가하였다. 본 연구를 통하여 팬케이크 형태로 권선된 고온초전도 마그넷에서 각각의 팬케이크 권선을 별도의 전원으로 여자하면 중심자장을 증가시킬 수 있는 것이 밝혀졌다.

**감사의 글**

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

**참 고 문 헌**

- [1] Drew W. Hazelton, et al., "Development and Test of a BSCCO-2223 HTS Field Insert Magnet for NMR," *IEEE Trans. on Applied Superconductivity*, vol. 27, no. 5, pp. 2181-2183, 1990.
- [2] S. S. Kalsi, et al., "HTS SMES Magnet Design and Test Results," *IEEE Trans. on Applied Superconductivity*, vol. 17, no. 2, pp. 971-976, 1997.
- [3] 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.
- [4] 이광연, 차귀수, "여러개의 전원을 이용한 팬케이크 권선으로 구성된 고온초전도 마그넷의 중심자장 증가," 대한전기학회 논문지, 제 56권, 제 9호, pp.1577-1583, 2007.
- [5] M. Kasper, "Shape Optimization by Evolution Strategy," *IEEE Trans. on Magnetics*, vol. 28, no. 2, pp. 1556-1559, 1992.



**이 용 석 (李 鎔 奭)**

1982년 5월 25일생, 2006년 순천향대공대 정보기술공학부졸업, 현 동대학원 석사과정

Tel : 010-2221-9872

E-mail : huntesi@hanmail.net



**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



**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 계약교수

Tel : 041-530-1334

E-mail : heejoonl@sch.ac.kr

**저 자 소 개**



**이 광 연 (李 光 淵)**

1973년 2월 5일생. 2000년 순천향대 전기공학과 졸업. 2003년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 박사과정.

Tel : 041-530-1334

Fax : 041-530-1548

E-mail : kwang-1@hanmail.net



**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