

여러개의 전원을 이용한 팬케이크 권선으로 구성된 고온초전도 마그넷의 중심자장 증가

論 文
56-9-10

Increment of HTS Magnet's Central Magnetic Field Made of Pancake Windings by Using Separate Sources

李光淵* · 車貴守†
(Kwang-Youn Lee · Guee-Soo Cha)

Abstract - The development of a magnet for very high magnetic field is usually envisioned with the use of an HTS insert coil. Pancake windings have been commonly used for the insert coil. All pancake windings have been connected in series and excited by a single power source. In that case, it is inevitable to operate some of the pancake windings well below their critical current densities. To increase the central magnetic field of the magnet, this paper proposed a new excitation method of the pancake windings by exciting the pancakes windings independently using multiple power sources. Results of the calculation show proposed method increases the central magnetic field of the magnet which consisted of 8 pancake windings by 17% comparing with excitation by using a single power source.

Key Words : HTS Magnet, Multiple Power Sources, Evolution Strategy

1. 서 론

임계전류밀도가 높은 초전도선을 사용하면 강한 자장을 발생시키는 고자장 마그넷을 제작할 수 있다. 높은 자장을 발생시키는 고자장 마그넷에서는 권선부분에도 높은 자장이 인가된다. 초전도선은 일반 도체로 제작한 선과는 달리 자장이 인가되면 초전도선에 흐를 수 있는 임계전류가 감소하는 특성을 갖고 있다. 고온초전도선은 저온초전도선에 비해서 외부 자장이 인가될 때에 임계전류가 감소하는 비율이 낮기 때문에, 고자장 마그넷을 제작할 때에는 자장이 비교적 약한 마그넷의 바깥 부분에는 저온초전도선으로 제작한 권선을 배치하고 자장이 강한 마그넷의 안쪽 부분에는 고온초전도선으로 제작한 권선을 배치하고 있다.[1] 마그넷의 안쪽에 배치되는 고온초전도 권선은 제작이 쉬운 팬케이크권선을 여러 개 적층해서 제작하고 있다.[2]-[4]

팬케이크권선을 여러 개 적층해서 마그넷을 제작하는 경우에 지금까지는 모든 팬케이크권선을 직렬로 연결해서 단일전원으로 권선을 여자하여 왔다. 여러 개의 팬케이크권선을 사용해서 마그넷을 제작하는 경우에 각 팬케이크권선에 인가되는 수직자장의 크기가 다르기 때문에 각 팬케이크권선의 임계전류도 다르다. 모든 팬케이크권선을 직렬로 연결해서 단일전원으로 여자하면 모든 팬케이크권선의 전류는 수직자장이 최대인 팬케이크권선에 흐를 수 있는

전류로 제한되기 때문에 인가되는 수직자장의 크기가 작은 팬케이크권선에는 임계전류보다 적은 전류가 흐르게 되어 비효율적이다.

본 연구에서는 여러 개의 전원으로 각각의 팬케이크권선에 흐르는 전류를 달리해서 마그넷이 발생하는 자장을 높이는 방식을 제안했다. 각 팬케이크권선에 흐르는 전류를 달리하면 모든 팬케이크권선에 임계전류까지를 통전할 수 있어 마그넷이 발생하는 자장을 높일 수 있다. 각각의 팬케이크권선에 흐를 수 있는 최대전류는 다른 팬케이크권선에 흐르는 전류에 영향을 받기 때문에 각 팬케이크권선에 흐르는 전류는 최적화기법을 사용하여 결정하였다. 팬케이크권선으로 구성되는 마그넷을 해석모델로 삼아 팬케이크권선의 개수를 달리하고 마그넷의 권선수를 달리하면서 단일전원으로 여자되는 마그넷의 중심자장과 별도전원으로 여자되는 마그넷의 중심자장을 비교하였다.

2. 단일전원방식과 별도전원방식

높은 자장을 발생시키는 마그넷을 제작하기 위해서는 일반 도체로 제작한 선에 비해서 전류밀도가 훨씬 높은 초전도선을 사용해서 권선을 하는 것이 유리하다. 높은 자장을 발생시키는 마그넷에서는 권선부분에도 높은 자장이 인가된다. 초전도선은 일반 도체로 제작한 선과는 달리 자장이 인가되면 초전도선에 흐를 수 있는 전류가 감소하는 특성을 갖고 있다. 납작한 테이프 형태로 제작되는 고온초전도선은 이방성에 때문에 초전도선에 수평방향의 자장이 가해질 때 보다는 수직방향의 자장이 가할 질 때에 임계전류가 감소하는 비율이 2배 정도 크다. 이에 따라 권선에 흐르는 전류를 결정하기 위해서는 권선에 인가되는 수직방향의 크기를 미리 계산하고 인가자장과 임계전류와의 관계를 나타내는

† 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

* 正 會 員 : 順天鄉大 大學院 電氣工學科 博士課程
接受日字 : 2007年 6月 13日
最終完了 : 2007年 8月 7日

Ic-B 특성곡선을 사용해서 임계전류를 결정한다.

높은 자장이 발생하는 마그넷에서는 자장에 의해서 발생하는 임계전류가 감소하는 비율이 대단히 커서 수직방향 자장의 영향을 정확히 고려하는 하는 것이 중요하다. 그림 1은 논문에서 사용된 BSCCO 고온초전도선의 Ic-B 특성을 측정한 값을 나타내며 초전도선에 수직방향 자장이 인가될 때 임계전류가 감소하는 정도를 보인 것이다. 그림 1에서 볼 수 있는 바와 같이 수직자장이 0.2T이면 임계전류는 자장이 인가되지 않을 때의 20% 정도에 불과하다. 이러한 이유로 초전도선을 이용해서 마그넷을 제작할 때 수직자장의 세기가 큰 마그넷 양쪽 끝 부분을 제거하기도 한다.[5]

고자장 마그넷은 일반적으로 바깥에 저온초전도선으로 제작한 마그넷을 배치하고 그 안쪽에 고온초전도선으로 제작한 마그넷을 배치한다. 마그넷의 안쪽에 배치되는 고온초전도선으로 제작한 마그넷은 솔레노이드권선이나 제작하기가 쉬운 팬케이크권선을 여러 개 적층한 것을 사용하고 있다.

팬케이크권선으로 마그넷을 제작하는 경우 지금까지는 모든 팬케이크권선을 직렬로 연결해서 단일 전원으로 권선을 여자하여 왔다. 그림 2.a)는 8개의 팬케이크권선을 직렬로 연결해서 단일전원으로 여자인 경우의 자력선 분포를 확대해서 보인 것이다. 팬케이크권선의 전체 권선 수는 1000턴, 권선의 내경은 50mm이고 위 쪽 4개 팬케이크 권선부분과 아래 쪽 4개 팬케이크 권선부분의 자력선 분포는 대칭이다. 팬케이크권선에서 수직자장이 가장 센 곳을 그림 2.b)에서 원으로 나타냈다. 팬케이크 권선에서 수직방향의 자장의 세기가 센 부분은 각 권선의 오른쪽 부분이고 그 중에서도 수직자장의 세기가 가장 센 곳은 맨 위쪽과 맨 아래쪽에 위치한 팬케이크권선이다.

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

단일전원으로 마그넷을 여자인 경우와 별도전원으로 마그넷을 여자인 경우를 비교해서 그린 것이 그림 3으로 그

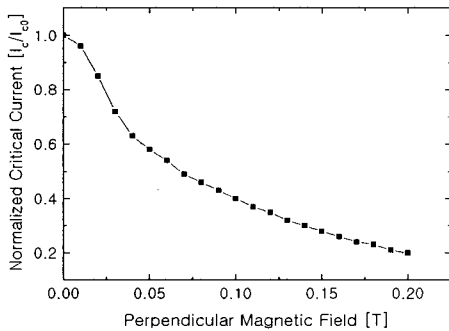
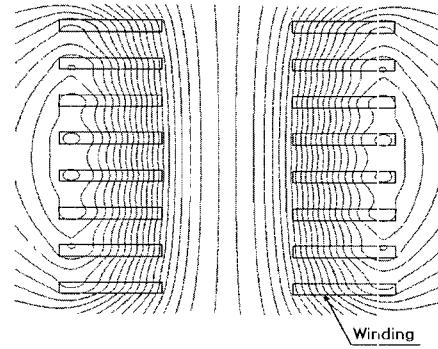
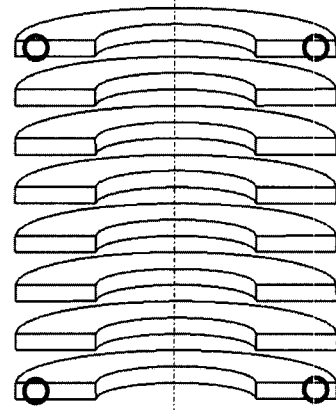


그림 1 BSCCO 선재의 Ic-B 특성곡선
Fig. 1 Ic-B characteristics of a BSCCO wire



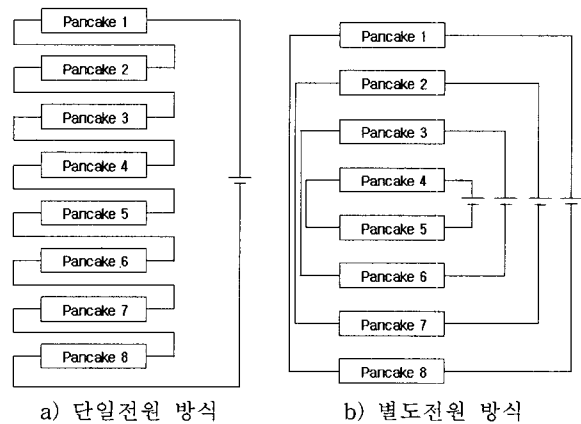
a) 자력선 분포



b) 수직자장이 가장 센 곳

그림 2 단일전원으로 여자되는 마그넷의 자력선 분포
Fig. 2 Distribution of magnetic flux of an HTS magnet

림 3.a)는 단일전원으로 마그넷을 여자인 방식이고 그림 3.b)는 본 연구에서 제안한 여러 개의 독립된 전원을 사용해서 마그넷을 여자인 방식이다. 위쪽 팬케이크 권선과 대칭적인 위치에 있는 아래쪽 팬케이크 권선의 자력선 분포는 동일하므로 수직자장의 세기도 동일하기 때문에 8개 팬케이크 권선의 경우에는 4개의 전원을 사용하면 된다.



a) 단일전원 방식

b) 별도전원 방식

그림 3 단일전원방식과 별도전원방식에 의한 마그넷의 여자
Fig. 3 Excitation of the magnet by a single power and multiple power

3. 팬케이크권선의 임계전류 계산

별도전원을 사용해서 각 팬케이크 권선에 흐르는 전류를 달리하면 단일전원을 사용해서 모든 팬케이크 권선에 동일한 전류를 흘리는 경우보다 높은 자장을 발생시킬 수 있다. 각 팬케이크 권선에 흐를 수 있는 임계전류를 결정하는 수직자장은 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 고려해야 한다.

본 연구에서는 마그넷이 발생하는 중심자장을 목적함수로 설정하고 이것이 최대가 되도록 팬케이크 권선에 흘릴 수 있는 전류를 결정하기 위해서 최적화 기법의 일종인 진화론적 방법을 사용하였다.

3.1 고온초전도선의 사양과 마그넷의 구조

여러 개의 전원을 사용한 팬케이크 권선을 설계할 때에 사용된 BSCCO 고온초전도선의 사양은 표 1과 같다. 고온초전도선의 임계전류는 126A, 폭과 두께는 각각 4.4mm와 0.285mm이다. 임계전류가 5% 감소하는 구부림직경은 38mm이다.

표 1 BSCCO 고온초전도선의 사양
Table 1 Specifications of BSCCO HTS wire

재질	BSCCO	임계전류	126A, 77K
폭	4.4mm	두께	0.285mm
최대장력	250MPa	구부림직경	38mm

8개의 팬케이크권선을 적층한 고온초전도마그넷의 모습을 보인 것이 그림 4이다. 권선에 사용된 보빈의 두께는 10mm이고, 권선의 내경은 50mm로 권선의 구부림직경을 고려하여 결정하였다. 권선의 턴과 턴 사이에는 두께가 1mm인 절연물을 넣었다.

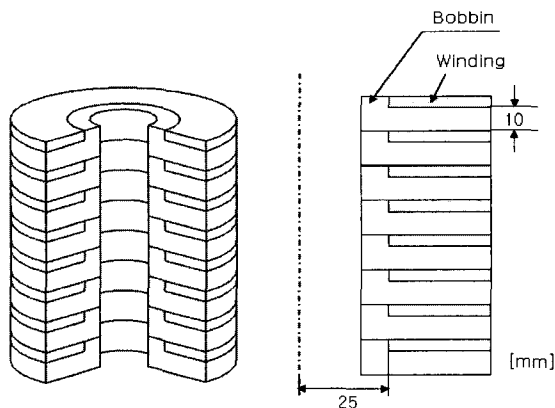


그림 4 8개의 팬케이크권선을 적층한 마그넷의 구조
Fig. 4 Structure of the magnet with 8 pancake windings

3.2 진화론적 방법 이론

최적화 설계에 많이 사용되는 비결정론적 최적화 기법으로 genetic algorithm, simulated annealing, evolution strategy 등을 들 수 있다.[6] 본 논문에서 마그넷의 팬케이크 권선에 흐르는 전류를 산정하기 위하여 사용된 (1+1) evolution strategy는 여러 변수에 대하여 수학적으로 규명이 잘되어 있고 알고리즘이 간단하면서도 수렴속도가 빠른 장점을 갖고 있다.[7]

(1+1) evolution strategy에서는 임의로 선정된 부모세대의 모델 변수 X_p 에서 자식세대의 모델 변수 X_c 를 발생시키는 데 이 과정은 식(1)와 같이 이루어진다.

$$X_c(i) = X_p(i) + a(i) \times R(i) \quad (1)$$

여기서, $R(i)$ 는 (-1,1)에서 발생하는 난수, $a(i)$ 는 $X_p(i)$ 를 중심으로 한 변화 가능폭, i 는 세대를 나타낸다.

진화론적 방법의 재생산과 변이과정에서, 다음 부모세대 변수인 $X_p(i+1)$ 는 식(2)과 같이 정해지며 수렴속도를 빨리 하기 위해서 목적함수의 변화의 정도에 따라 세대의 변화폭을 달리하여 수행한다.

$$X_p(i+1) = \begin{cases} X_c(i), & \text{if } F_c(i) > F_p(i) \\ X_p(i), & \text{if } F_c(i) \leq F_p(i) \end{cases} \quad (2)$$

여기서, $F_c(i)$ 와 $F_p(i)$ 는 각각 자식세대의 목적함수와 부모세대의 목적함수를 나타낸다.

3.2 최적화기법을 이용한 팬케이크권선의 전류 계산

각 팬케이크권선에 흐를 수 있는 임계전류는 다른 팬케이크권선에 흐르는 전류에 의해서 영향을 받기 때문에 최적화 기법의 일종인 진화론적 방법을 사용하여 팬케이크권선에 흐르는 전류를 구하였다.

최적화과정에서 설계변수는 팬케이크 권선에 인가되는 전류로서 팬케이크 권선에 흐르는 전류를 변화시켜서 중심자장이 최대가 되도록 했다. 팬케이크 권선에 흐르는 전류를 가정하고 이때에 발생하는 수직자장이 인가될 때에 권선의 임계전류가 가정한 전류이내가 되도록 다음과 같은 부등호 제약조건을 부과했다.

$$B_{i,\perp} \leq B_c \quad (3)$$

여기서, $B_{i,\perp}$ 와 B_c 는 각각 인가전류에 의해 선재에 가해지는 수직자장과 B-I 곡선상의 허용수직자장을 나타낸다.

수직자장이 가해질 때에 흐를 수 있는 전류는 그림 1의 Ic-B 특성곡선을 사용하여 결정하였다. 최적설계의 대상인 마그넷은 자성체를 사용하고 있지 않으므로 마그넷의 중심자장과 고온초전도권선부분에서의 수직자장은 식 (4)와 같은 비오사바르법칙을 사용하여 수치적으로 계산하였다.

$$\vec{H} = \oint \frac{Id\vec{L} \times \vec{a}_R}{4\pi R^2} \quad (4)$$

4. 계산 결과

팬케이크권선의 개수와 권선수를 달리하면서 단일전원을 사용한 경우와 별도전원을 사용한 경우의 중심자장을 계산하였다. 팬케이크권선의 개수가 4개, 6개, 8개, 10개인 경우에 대해서 계산하였고 팬케이크권선의 전체 권선수는 600턴에서 1400턴까지 200턴씩 증가시키면서 계산하였다.

먼저 최적화기법을 사용하여 단일전원으로 여자한 경우 임계전류를 계산한 결과 팬케이크 권선 수가 4개, 6개, 8개, 10개인 경우에 임계전류값은 각각 44.45A, 45.25A, 48.27A, 51.24A이었다. 별도전원인 경우에도 단일전원의 임계전류값을 초기값으로 하여 각 팬케이크 권선에 흘릴 수 있는 전류를 최적화기법을 사용하여 계산하였다.

그림 5는 별도전원으로 여자되는 8개의 팬케이크권선의 임계전류가 수렴하는 과정으로 8개 팬케이크 권선의 전체 권선수는 1000턴이다. 그림에서 가로축은 최적화가 진행되는 세대 수이고 세로축은 각 팬케이크 권선의 임계전류이다. 가장 아래쪽 팬케이크 권선부터 가장 위쪽 팬케이크 권선까지 1번에서 8번으로 정하면 그림 5에서 I_1 은 가장 바깥쪽에 위치한 1번 팬케이크 권선의 임계전류이고 I_2, I_3 및 I_4 의 순서로 안쪽으로 향하는 2번, 3번, 4번 팬케이크 권선의 임계전류이다.

마그넷의 수직자장의 분포는 상하대칭이기 때문에 위쪽에 위치한 4개 팬케이크 권선의 임계전류는 아래쪽에 위치한 4개의 팬케이크 권선의 임계전류와 동일하다. 예를 들어 I_5 는 I_4 와 동일하고 I_6 은 I_3 와 동일하다. 가장바깥에 위치한 1번 팬케이크권선으로부터 가장 안쪽에 위치한 4번 팬케이크 권선까지의 임계전류는 44.07A, 47.57A, 59.26A, 62.60A로서 팬케이크 권선에 인가되는 수직자장의 세기가 강한 바깥쪽 팬케이크 권선의 임계전류는 낮고 수직자장의 세기가 약한 안쪽 팬케이크 권선의 임계전류는 높은 것을 알 수 있다.

별도전원을 사용한 경우 팬케이크권선 임계전류의 평균값은 53.38A로서 단일전원을 사용했을 때의 임계전류 48.27A보다 10.5% 증가해서 별도전원을 사용하면 마그넷이 발생하

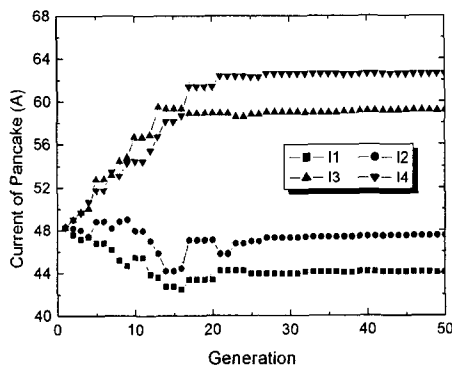


그림 5 별도전원으로 여자되는 8개의 팬케이크권선의 임계 전류가 수렴하는 과정

Fig. 5 Convergence of critical currents of 8 pancake windings

는 자장이 증가할 것이라는 것을 예상할 수 있다. 특히 마그넷의 중심에서 가장 멀리 있는 1번 팬케이크권선의 임계전류는 8.7% 감소했지만 중심에서 가장 가까운 4번 팬케이크권선의 임계전류는 29.7% 증가해서 별도전원을 사용한 마그넷의 중심자장의 증가율은 평균전류의 증가율 10.5%보다 훨씬 클 것이라는 것도 예상할 수 있다.

표 2는 팬케이크권선의 개수가 4개, 6개, 8개, 10개인 마그넷을 단일전원으로 여자하는 경우와 별도전원으로 여자하는 경우 각 팬케이크권선에 흐르는 임계전류이다. 단일전원으로 여자하는 경우의 임계전류는 I 로 표시했고 별도전원으로 여자하는 경우의 임계전류는 I_i 로 표시했다. 마그넷의 자장분포가 상하 대칭이므로 i 는 팬케이크권선 개수의 절반이다. I_{avg} 는 별도전원을 사용한 경우 팬케이크권선 임계전류의 평균값이다. 별도전원으로 여자하면 가장 바깥에 위치한 팬케이크권선에 흐르는 전류 I_1 은 단일전원으로 여자하는 경우에 흐르는 전류 I 보다 감소하나 나머지 팬케이크권선에 흐르는 전류는 단일전원으로 여자하는 경우보다 증가했고 안쪽 팬케이크권선으로 갈수록 증가하는 비율도 증가했다.

표 2 팬케이크 권선의 권선수가 4, 6, 8, 10개인 마그넷의 임계전류

Table 2 Critical Currents of Pancake windings

	4	6	8	10
단일여자 I	44.45	45.25	48.27	51.24
별도여자 I_1	41.93	39.31	44.07	45.46
I_2	50.89	51.79	47.57	54.10
I_3	-	57.70	59.26	61.27
I_4	-	-	62.60	64.77
I_5	-	-	-	66.19
I_{avg}	46.41	49.60	53.38	58.36

팬케이크권선의 개수가 4개, 6개, 8개, 10개인 마그넷의 임계전류가 수렴하여 감에 따라 중심자장이 변화하는 과정을 그림 6에 보였다. 그림 6에서 모든 마그넷의 전체 권선수는 1000턴이고 모두 별도전원으로 여자하는 경우이다.

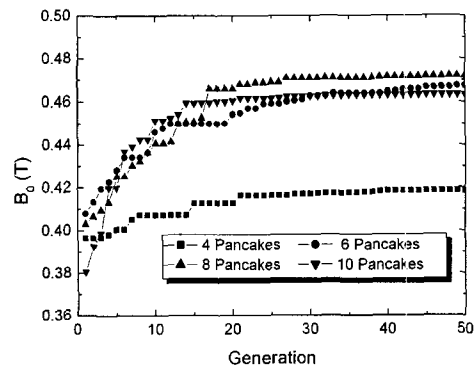


그림 6 별도전원으로 여자되는 팬케이크권선의 중심자장이 변화하는 과정

Fig. 6 Optimization process of central magnetic field

그림 7은 전체 권선수가 1000턴으로 동일한 마그넷의 팬케이크권선의 개수변화에 따른 중심자장의 변화를 나타낸 것이다. 사각형기호와 원형기호는 각각 단일전원으로 여자되는 마그넷과 별도전원으로 여자되는 마그넷의 중심자장을 표시한다. 팬케이크 권선수를 증가하면 마그넷의 중심자장은 증가했다가 감소한다. 이는 팬케이크 권선의 수가 너무 작으면 하나의 팬케이크권선의 권선수가 많아지기 때문에 수직자장이 증가하여 임계전류가 감소하는 정도가 커서 중심자장이 낮아지기 때문이다. 반대로 팬케이크 권선의 수가 너무 많아지면 팬케이크권선에 인가되는 수직자장의 세기는 적어지지만 중심에서 멀리 떨어진 팬케이크권선에서 발생하는 자장이 중심자장에 미치는 영향이 적어지기 때문이다.

마그넷을 단일전원으로 여자하는 경우는 팬케이크권선을 6개 사용하는 것이 중심자장을 가장 높일 수 있으며 별도전원으로 여자하는 경우는 8개 사용하는 것이 중심자장을 가장 높일 수 있다. 팬케이크 권선수가 8개인 마그넷의 경우 복수전원을 사용할 경우 마그넷의 중심자장은 0.472T로서 단일전원을 사용할 때의 중심자장 0.403T보다 17% 증가했다.

전체 권선수가 1000턴으로 동일한 마그넷의 팬케이크권선의 개수변화에 따른 최대수직자장의 변화를 나타낸 것이 그림 8로 마그넷의 전체 권선영역에서 수직자장이 가장 센 곳의 세기이다. 각 팬케이크 권선에서 수직방향의 자장의 세기가 센 부분은 각 권선의 오른쪽 부분이고 그 중에서도 수직자장의 세기가 가장 큰 곳은 맨 위쪽과 맨 아래쪽에 위치한 팬케이크 권선이다. 단일전원으로 여자되는 마그넷의 최대수직자장은 전체 마그넷의 임계전류를 제한하는 데에 비해서 별도전원으로 여자되는 마그넷의 수직자장은 가장 바깥쪽에 대칭적으로 위치한 두 개의 팬케이크권선의 임계전류만을 제한한다.

그림 8에서 볼 수 있는 바와 같이 단일전원으로 여자되는 마그넷의 경우 각 팬케이크권선에 흐르는 전류가 일정하기 때문에 팬케이크권선의 개수를 증가하면 각 팬케이크권선의 권선수가 감소하기 때문에 최대수직자장도 감소한다. 그러나 별도전원으로 여자되는 경우는 각 팬케이크권선에 흐르는 전류가 다르기 때문에 본 연구에서와 같이 비확률논적인 방법으로 팬케이크 권선에 흐르는 전류를 계산한 경우에는 최대수직자장의 변화는 일정한 추세를 갖지 않을 수도 있다.

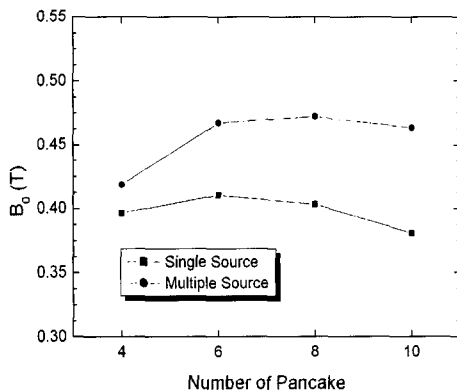


그림 7 팬케이크 권선의 개수변화에 따른 중심자장의 변화
Fig. 7 Magnetic field at the center of magnet according to number of pancake windings

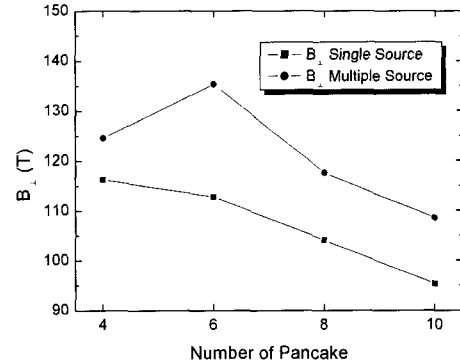
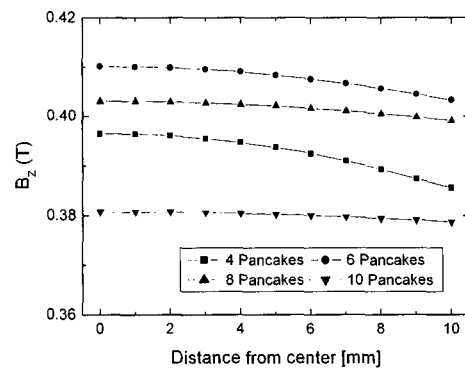


그림 8 팬케이크 권선의 개수변화에 따른 수직자장의 변화
Fig. 8 Perpendicular magnetic field of pancake windings according to number of pancake windings

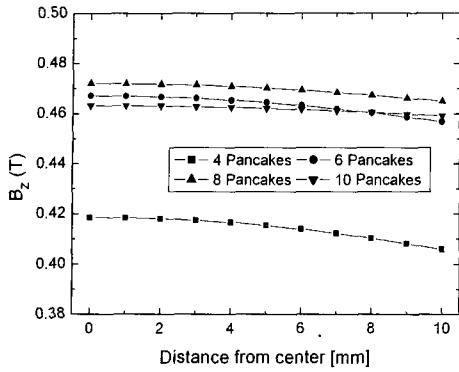
별도전원으로 여자하는 마그넷의 경우에 중심자장은 각 팬케이크권선에 흐르는 전류와 팬케이크권선의 배치에 의해서 결정된다. 별도전원으로 마그넷을 여자하는 경우 마그넷의 중심에 가까운 팬케이크권선은 수직자장이 약하기 때문에 전류가 많이 흐르고 중심에서 먼 팬케이크권선은 수직자장이 강하기 때문에 전류가 적게 흐른다. 이에 따라 별도전원을 사용해서 마그넷을 여자할 경우 중심자장의 세기는 증가하지만 축방향에 따른 중심자장의 변화가 단일전원으로 마그넷을 여자하는 경우에 비해서 커지게 된다.

단일전원으로 여자되는 마그넷과 별도전원으로 여자되는 마그넷에서 팬케이크권선의 개수변화에 따른 축방향 자장의 변화를 나타내면 그림 9와 같다. 그림 9에서 가로축은 마그넷의 중심으로부터 축방향으로의 거리를 나타낸 것이고 세로축은 그때의 축방향 자장의 값(B_z)을 나타낸 것이다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 단일전원으로 여자되는 마그넷과 별도전원으로 여자되는 마그넷 모두 팬케이크 권선의 수가 증가할수록 축방향 자장의 변화율이 감소한다.

팬케이크권선의 개수가 8개인 마그넷의 경우에 단일전원으로 여자하는 마그넷과 별도전원으로 여자되는 마그넷의 중심으로부터 축방향으로 10mm 떨어진 점에서의 축방향 자장의 감소율은 각각 1%와 1.5%로서 별도전원으로 여자하는 경우가 약간 증가했다.



a) 단일전원



b) 별도전원

그림 9 팬케이크권선의 개수변화에 따른 축방향자장 변화
 Fig. 9 Central magnetic field along according to number of pancake windings

팬케이크권선의 개수가 8개인 마그넷의 전체 권선수를 변화시키면서 이때 발생하는 중심자장을 표시한 것이 그림 10이다. 마그넷의 전체 권선수가 증가하면 팬케이크권선의 권선수도 따라서 증가한다. 팬케이크권선의 권선수가 증가하면 팬케이크권선에 인가되는 수직자장이 커지게 되어 임계전류가 감소하게 되어, 마그넷의 전체 권선수가 증가할 때에 중심자장이 감소하는 비율은 전체 권선수가 증가하는 비율보다 낮아진다. 이에 따라 최대중심자장을 발생하는 팬케이크권선의 개수는 마그넷의 전체 권선수에 따라서 달라질 수 있다.

그림 10에서 전체 권선수가 600턴인 경우에 1200턴인 경우를 비교하면 단일여자의 경우는 44% 증가했고 별도전원의 경우는 47% 증가해서 단일전원의 경우가 중심자장 값 자체도 적을 뿐 아니라 중심자장이 증가하는 비율도 낮아지는 것으로 나타났다.

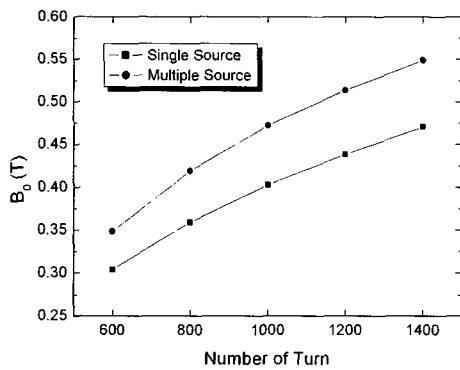


그림 10 전체 권선수의 변화에 따른 중심자장의 변화
 Fig. 10 Magnetic field at the center of the magnet according to total number of turns

5. 결 론

본 연구에서는 팬케이크권선으로 제작되는 마그넷이 발생하는 중심자장을 증가시키기 위한 방법으로 각 팬케이크권

선에 흐르는 전류를 달리하는 별도전원방식을 제안하였다. 각 팬케이크권선에 흐르는 전류는 최적화기법을 사용하여 구하였다.

계산결과에 의하면 별도전원방식으로 마그넷을 여자하면 단일전원방식으로 마그넷을 여자할 때에 비해서 중심자장을 상당히 증가시킬 수 있는 것으로 밝혀졌다. 전체 권선수가 1000턴이고 8개의 팬케이크권선으로 구성되는 마그넷의 경우에 별도전원으로 여자하면 중심자장이 0.472T이었으나 단일전원으로 여자하면 중심자장이 0.403T에 그쳐 별도전원을 사용하면 단일전원을 사용하는 경우에 비해서 중심자장을 17% 증가시킬 수 있다.

본 연구를 통해서 제안된 마그넷의 별도전원 여자방식과 최적화 기법을 이용한 허용전류 산정방식은 높은 중심자장을 필요로 하는 마그넷의 설계에 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] H. W. Weijers, et al., "Development of a 5 T HTS Insert Magnet as Part of 25 T Class Magnets," IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol.13, No.2, pp.1363-1399, 2003
- [4] Kenji Tasaki, et al., "Development of a Bi2223 Insert Coil for a Conduction-Cooled 19 T Superconducting Magnet," IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol.15, No.2, pp.1512-1515, 2005
- [5] So Noguchi, et al., "An Optimal Design Method for Superconducting Magnets Using HTS Tape," IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol.11, No.1, pp.2308-2311, 2001
- [6] Cha Wang, Qiuliang Wang, et al., "Electromagnetic optimization design of a HTS magnet using the improved hybrid genetic algorithm," Cryogenics 46, pp.349-353, 2006
- [7] M. Kasper, "Shape Optimization by Evolution Strategy," IEEE Trans. on Magnetics, Vol.28, No.2, pp.1556-1559, 1992

저 자 소 개



이 광 연 (李 光 淵)

1973년 2월 5일생. 2000년 순천향대 전기 공학과 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



차 귀 수 (車 貴 守)

1956년 7월 8일생. 1978년 서울대 공대 공업교육과 졸업, 1987년 동대학원 전기 공학과 졸업(박사). 현재 순천향대 전기 통신시스템공학과 교수.

Tel : 041-530-1334

Fax : 041-530-1548

E-mail : gsoocha@sch.ac.kr