고온 초전도 마그넷의 선재에서 발생하는 자장과 전계 해석

논 문

60-4-11

Magnetic Field and Electric Field Generated in an HTS Tape of a High Temperature Superconducting Magnet

김 영 민* · 구 명 환** · 차 귀 수† · 전 창 완*** · 백 경 호§

(Youngmin Kim · Myunghwan Ku · Gueesoo Cha · Changwan Jeon · kyoung-ho Paik)

Abstract - Magnetic field and Electric field of High Temperature Superconducting magnet are very important to analysis of superconducting magnet. The maximum perpendicular magnetic field was applied to the outermost pancake windings. The critical current of all the magnet windings is limited by the critical current of the outermost pancake windings. The E - J relation was used to determine the critical current, and an evolution strategy was adopted for the optimization of gap length between each pancake windings. The results of calculations show that the critical current and the central magnetic field and uniformity increased by 82.6% and 31.6% and 50.8%, respectively, for a magnet consisting of ten pancake windings. This paper did an analysis the cause of increase the critical current and central magnetic field and uniformity in no gap and optimal gap model.

Key Words : Critical current, Electric field, HTS Magnet, Magnetic field

1. 서 론

오늘날 MRI, NMR 등의 초전도 응용 기기들은 우리의 삶에 밀접하게 다가왔고, 사람들은 초전도 응용 기기들의 더 높은 성능을 요구하게 되었다. 이에 많은 초전도 응용 분야에서 성능을 높이기 위한 연구가 진행 중이며, 그 중 초전도 마그넷 분야는 중심자장과 균일도의 향상에 많은 관심과 연구가 집중되고 있다. 초전도 마그넷 분야에서 중심자장과 균일도의 향상은 초전도 응용 기기들의 성능향상을 의미하기에 중요하다[1-2].

이론적으로 초전도 선재는 저항이 없다고 알려져 있지만 실제 한계가 있어, 임계온도, 임계전류, 임계자장 중 하나라도 임계값을 초과하면 저항이 발생한다. 따라서 임계값을 벗어나지 않으면서 중심자장과 균일도의 향상을 이루기 위한 방안들이 연구되고 있으며, 몇 가지 방안들이 제안되었다. 그 중 하나가 다이버터로 수직자장을 줄여 임계전류를 높이는 방안이다. 이 방안은 전체 마그넷의 임계전류를 제한하는 최외각 코일의 수직자장을 줄여, 중심자장을 높일 수 있다. 또 다른 방안은 마그넷의 형상을 최적화하는 방안이다. 이 방안은 마그넷을 구성하는 코일들의 턴 수와 위치 등을 변화시켜 최적의 형상을 구성하여, 중심자장을 높일 수

있다. 그리고 별도전원을 사용하여 마그넷 중심부분 코일까지 임계전류를 인가하는 방안이다. 이 방안은 최외각 코일의 임계전류가 가장 낮아서 전체 마그넷의 임계전류를 제한하던 문제를 해결하여, 마그넷을 구성하는 각 코일들의 임계전류까지 전류를 통전시킬 수 있다. 단, 전원을 많이 사용한다는 점에서 비효율적이다[3-5].

본 논문에서는 중심자장과 균일도를 향상시키기 위한 방안으로 Bi-2223선재를 팬케이크 형태로 권선한 HTS 마그넷을 기본 모델로 설정하고, 각 팬케이크 권선 사이에 서로 다른 길이의 공극 설정을 제안한다. 서로 다른 길이의 공극들은 진화론적 방법으로 최적화 하였고, 모든 팬케이크 권선의 내경과, 외경, 턴수를 각각 70mm, 139mm, 100턴으로 고정하여 계산했다. 그리고 계산에 적용된 팬케이크 권선의 개수는 개별적인 공극을 여러 마그넷 형상에 적용시키기 위해서 4개부터 12개까지 2개씩 증가시켰다. 각 경우에 대한 계산결과는 각 턴에서의 전계, 선재에 인가되는 자장의 크기와 각도, 임계전류, n -value를 공극이 없는 형상과 비교하여 원인을 분석하였다.

2. 개별공극의 효과

공극이 없는 형상과 서로 다른 길이의 공극이 있는 형상에서 자장분포는 그림 1과 같다. 그림 1(a)의 공극이 없는 형상의 경우에는 최외각 팬케이크 권선에 최대 수직자장이 인가되며, 최외각 팬케이크 권선에서 임계전류가 제한된다. 이로 인해 공극이 없는 형상은 개별적인 공극이 있는 형상보다 선재의 효율이 낮고, 마그넷의 성능이 떨어진다. 균일한 공극이 있는 마그넷 형상의 경우에는 최대 수직자장이 최외각 팬케이크 권선에서 발생하지만, 공극이 없는 모델보다 평균적으로 수직자장이 낮다[6]. 따라서 균일한 공극은

* 준 회 원 : 순천향대 전기통신공학과 석사과정

** 정 회 원 : 순천향대 전기통신공학과 박사과정

*** 정 회 원 : 순천향대 전기통신공학과 교수

§ 정 회 원 : 순천향대 전기통신공학과 교수

† 교신저자, 펠로우회원 : 순천향대 전기통신공학과 교수

E-mail : gschocha@sch.ac.kr

접수일자 : 2010년 12월 2일

최종완료 : 2011년 2월 28일

공극이 없는 경우보다 임계전류를 증가시키고, 중심자장과 균일도가 향상된다. 그림 1(b)의 서로 다른 길이의 공극이 있는 형상은 모든 팬케이크 권선의 각 턴에 비교적 균일한 수직자장이 인가되며, 모든 팬케이크 권선의 임계전류가 비슷하게 계산된다. 마그넷 전체의 임계전류는 모든 팬케이크 권선의 임계전류와 비슷하게 형성되어 앞의 두 경우보다 선재의 효율이 크게 높아지고, 성능도 크게 증가한다.

(a) 공극이 없는 형상 (b) 개별 공극이 있는 형상

그림 1 HTS 마그넷의 자장분포

Fig. 1 Magnetic field of HTS magnet

3. 해석형상의 사양

계산에 사용된 선재의 두께는 0.285mm이고, 폭은 4.4mm이며, 77K에서 측정된 임계전류는 125A인 선재이다. 그 밖에 계산에 사용된 초전도 선재의 사양은 표 1에 나타냈다.

표 1 Bi-2223 선재의 사양

Table 1 Specifications of Bi-2223 wire

Material	Bi-2223
I_c (self filed, 77K)	125A
Width	4.4mm
Thickness	0.285mm
Minimum bending diameter	38mm

팬케이크 권선의 각 턴 사이는 0.06mm의 절연테이프를 절연했고, 이를 감안하여 팬케이크 권선 당 사용된 선재의 총길이는 약 32.8m이다. 모든 팬케이크 권선의 내경, 외경, 턴수는 각각 70mm, 139mm, 100턴으로 고정했다. 해석 형상의 사양은 표 2와 같다. 팬케이크 권선의 개수를 4개에서 12개까지 2개씩 증가시키며 계산했다.

표 2 해석 형상의 사양

Table 2 Specifications of model magnet

Insulation thickness	0.06mm
No. of turns per pancake winding	100
Inner radius	35mm
Outer radius	69.5mm
No. of pancake windings	4~12

4. 계산방법

팬케이크 권선을 적층한 고온 초전도 마그넷의 각 턴에 인가되는 자장의 크기와 각도는 마그넷 임계전류 결정에 큰 영향을 미친다. 그 중 선재에 수직으로 인가되는 자장이 수평으로 인가되는 자장보다 임계전류를 결정하는데 있어서 영향이 크다. 이에 일부 논문들에서는 마그넷 최외각 팬케이크 권선에 인가되는 최대 수직자장의 값으로 임계전류를 결정한다[7]. 그러나 본 논문에서는 수직자장의 영향과 수평자장의 영향 모두 임계전류를 산정하는데 필요한 중요한 요소로 보고 두 성분을 고려하였다.

본 논문에서는 중심자장과 균일도가 향상된 원인을 분석하기 위해 외부자장의 크기와 각도, 임계전류, n -value, 전계를 계산하여 최적화된 공극이 있는 형상과 공극이 없는 형상을 비교분석했다.

마그넷의 통전전류가 결정 되면 각 턴에 인가되는 외부자장의 크기와 각도가 결정되고, 이 외부자장의 크기와 각도로 각 턴에서의 임계전류와 n -value가 계산된다. 전계는 통전전류와 각 턴에서의 임계전류, n -value 그리고 기준전계를 바탕으로 계산된다. 각 턴에서의 수직자장과 수평자장은 한 턴을 M 개의 요소로 나누어, 유한요소법으로 계산한 후 평균을 취하여 구했다. 계산 과정은 다음과 같다.

1. 각 턴의 단면적을 그림 2와 같이 M 개의 요소로 나눈다.

그림 2 M 개의 요소로 나눈 각 턴

Fig. 2 M segments of each turn

2. 각 요소 중심에서의 수직자장($B_{\perp}$)과 수평자장($B_{\parallel}$)을 유한요소법으로 계산한다.

3. 각 요소의 수직자장의 평균($\overline{B_{\perp}}$)과 수평자장의 평균($\overline{B_{\parallel}}$)을 식 (1)과 같이 계산하고, 해당 턴에 인가되는 자장의 크기(B)와 각도(θ)를 식 (2)와 같이 계산한다. 식 (1)에서 M 은 요소의 개수, T 는 해당 턴, k 는 해당 요소를 의미한다.

$$\overline{B_{\parallel,T}} = \frac{\sum_{k=1}^M B_{\parallel,Tk}}{M} \quad \overline{B_{\perp,T}} = \frac{\sum_{k=1}^M B_{\perp,Tk}}{M} \quad (1)$$

$$B_T = \sqrt{(\overline{B_{\parallel,T}})^2 + (\overline{B_{\perp,T}})^2} \quad \theta_T = \tan^{-1}\left(\frac{\overline{B_{\perp,T}}}{\overline{B_{\parallel,T}}}\right) \quad (2)$$

4. 식 (3)과 식 (4)에 해당 턴에 인가되는 자장의 크기(B)와 각도(θ)를 대입하여 해당 턴의 I_c 와 n -value를 얻는다 [8-9].

$$I_c = \frac{Z_0 + Z_1 \times \theta + Z_2 \times B + Z_3 \times B^2 + Z_4 \times B \times \theta}{1 + Z_5 \times \theta + Z_6 \times B + Z_7 \times \theta^2 + Z_8 \times B^2 + Z_9 \times B \times \theta} \quad (3)$$

$$n = \frac{K_0 + K_1 \times \theta + K_2 \times B + K_3 \times B^2 + K_4 \times B \times \theta}{1 + K_5 \times \theta + K_6 \times B + K_7 \times \theta^2 + K_8 \times B^2 + K_9 \times B \times \theta} \quad (4)$$

길이가 10cm인 Bi-2223선재에 인가되는 외부자장의 크기와 각도를 변화시키며 V - I 곡선을 측정하고, 이 값으로 외부자장의 크기와 각도에 따른 임계전류와 n -value를 그림 3에 나타냈다. 그림 3의 그래프를 각각 보간하여 식 (3)과 식 (4)를 얻었으며, 식 (3)과 식 (4)의 계수들은 표 3에 나타났다. 그림 3(a)의 I_c - B 관계에서 자장의 크기와 각도가 각각 75.4mT, 0°일 때 임계전류는 130.17A, 자장의 크기와 각도가 각각 783.1mT, 90°일 때 임계전류는 0.04A로 측정되었다. 그림 2(b)의 n -value 관계에서 자장의 크기와 각도가 각각 39.2mT, 0°일 때 n -value는 20.7, 자장의 크기와 각도가 각각 783.1mT, 90°일 때 n -value는 1.2로 측정되었다.

그림 3 외부자장의 크기와 각도변화에 따른 I_c - B 관계와 n -value

Fig. 3 I_c - B relation and n -value at various magnetic field

표 3 식 (3)과 식 (4)의 각 상수 값

Table 3 Coefficients used in eq.(3) and eq.(4)

식 (3) I_c - B 의 각 상수값			
Z_0	134.73424	Z_5	0.00287
Z_1	1.00257	Z_6	0.23654
Z_2	8.26964	Z_7	0.0000582
Z_3	64.61392	Z_8	3.59883
Z_4	-5.10508	Z_9	0.20625
식 (4) n -value의 각 상수값			
K_0	12025800	K_5	-1133812
K_1	-38765400	K_6	-209859000
K_2	-5199220000	K_7	-20585.96915
K_3	1727880000	K_8	-552132000
K_4	82381100	K_9	-14524400

5. 해당하는 턴의 $I_{c,T}$ 와 n_T -value, 기준전계 E_0 그리고 통전전류를 식(5)의 power law에 대입하여 각 턴에 발생하는 전계 E_T 를 계산한다. 여기서 기준전계 E_0 는 1μV/cm이다.

$$E_T = E_0 \times \left(\frac{I}{I_{c,T}} \right)^{n_T} \quad (5)$$

5. 계산결과

고온초전도 마그넷의 각 팬케이크 권선 사이에 공극이 없는 형상에서는 일반적으로 최외각 팬케이크 권선에서 가장 높은 수직자장이 발생되기 때문에, 위에서 설명한 방법으로 전계를 계산하면 최외각 팬케이크 권선에서 가장 높은 전계가 발생한다. 그래서 마그넷의 최외각 팬케이크 권선의 임계전류가 마그넷의 임계전류로 결정된다. 이로 인해 고온초전도 마그넷은 안쪽 팬케이크 권선에 더 높은 전류를 흘릴 수 있음에도 최외각 팬케이크 권선에서 결정된 임계전류가 이를 제한하므로 각 팬케이크 권선의 효율이 낮아진다.

본 논문에서는 중심자장과 균일도를 향상시키기 위한 방안으로 서로 다른 길이의 공극을 설정하여 최외각 팬케이크 권선에 인가되는 수직자장을 줄이는 방안을 제시하고, 계산했다.

팬케이크 권선의 개수가 12개일때 공극이 없는 형상의 경우 임계전류와 중심자장, 균일도는 각각 28.8A, 378.5mT, 3.78%였고, 최적 공극이 있는 형상의 경우 임계전류와 중심자장, 균일도는 각각 52.6A, 498.1mT, 1.92%로 계산되었다. 균일도는 마그넷의 중심자장과 마그넷의 중심에서 10mm 떨어진 지점의 자장 차이를 중심자장으로 나누어 퍼센트로 나타내었으며, 낮을수록 균일도가 높다. 최적 공극이 설정됨으로써 임계전류는 82.6%가 증가했고, 중심자장은 31.6%가 증가했으며, 균일도는 49.2%가 향상되었다. 이렇게 임계전류와 중심자장, 균일도가 증가한 원인을 찾기 위해 공극이 없는 형상과 최적 공극이 있는 형상의 외부자장의 크기와 각도, 임계전류, n -value, 전계를 계산하여 비교했다.

먼저 공극이 없는 형상과 최적 공극이 있는 형상에 대해 팬케이크 권선의 각 턴에 인가되는 외부자장의 각도를 비교했다. 최적 공극이 있는 형상은 공극이 없는 형상에 비해 마그넷 형상의 높이가 길게 형성된다. 이로 인해 자장의 패턴은 공극이 없을 때 보다 최적 공극이 있을 때 더욱 길쭉한 형태로 형성된다. 이와 같은 이유로 최적 공극이 있는 형상에서 각 팬케이크에 인가되는 자장의 각도는 공극이 없는 형상보다 감소한다.

그림 4(b)의 최적 공극이 있는 형상의 경우는 최외각 팬케이크 권선인 1번 팬케이크 권선에서 그림 4(a)의 공극이 없는 경우 보다 전체적으로 외부자장의 각도가 낮다. 이는 최적 공극이 설정됨으로써 최외각 팬케이크 권선에 인가되는 수직자장의 크기가 감소하였기 때문이다. 그러나 1번 팬케이크 권선을 제외한 나머지 부분은 각도가 증가하였다. 이것은 최외각 팬케이크 권선에 집중적으로 인가되던 수직자장이 최적 공극을 설정함으로써 각 팬케이크에 고르게 인가되기 때문이다. 최적 공극은 마그넷의 형상을 변화시켜서 자장의 패턴을 변화시키고, 이것은 최외각 팬케이크 권선에서 제한되던 임계전류를 높여서 중심자장을 증가시킨다.

그림 4 팬케이크 권선의 각 턴에 인가되는 외부자장 각
Fig. 4 Angle of magnetic field applied to each turn of pancake windings

외부자장의 크기는 최적 공극이 설정됨으로써 외각부분 팬케이크 권선들이 중심에서 거리가 멀어져 전체적으로 그림 5의 1번과 2번 팬케이크 권선 같이 감소하였고, 중심부분 팬케이크 권선들은 임계전류가 상승하여, 그림 5의 3, 4, 5, 6번 팬케이크 권선 같이 전체적으로 증가하였다. 중심자장은 대부분 중심부분 팬케이크 권선에서 발생되므로, 앞서 설명한 임계전류의 상승이 중심부분 팬케이크 권선들의 전체적인 자장을 증가시켰다. 최외각 팬케이크 권선에서 외부자장의 크기는 최적 공극이 설정되었을 때 전체적으로 낮아졌는데, 이는 임계전류를 증가시킨 큰 원인중 하나이다. 또한 팬케이크 권선들이 중심에서 멀어졌기 때문에 마그넷 형상의 세로 길이가 길어져 균일도를 향상시킨다.

최외각 팬케이크 권선의 외부자장의 크기가 전반적으로 감소하고, 앞서 설명한 외부자장의 각도도 전체적으로 낮아졌기 때문에, 임계전류는 큰 폭으로 증가했다. 단, 최외각 팬케이크 권선을 제외한 팬케이크 권선들의 외부자장의 크기와 각도가 전체적으로 증가하여 이중 하나가 임계전류를 제한할 수도 있다.

그림 5 팬케이크 권선의 각 턴에 인가되는 외부자장의 크기
Fig. 5 Magnitude of magnetic field applied to each turn of pancake windings

앞서 설명한 바와 같이 외부자장의 크기의 변화와 각도의 패턴변화로 인해 임계전류가 상승하고, 그 원인으로 중심자장이 증가한다. 임계전류는 그림 6(a)의 공극이 없는 형상의 경우 최외각 팬케이크 권선인 1번에서 제일 낮았다. 그래서 안쪽 팬케이크 권선의 임계전류가 높아도 최외각 팬케이크 권선에 의해 전체 마그넷의 임계전류는 제한된다. 본 논문에서는 최적 공극을 설정하여 전체 마그넷의 임계전류를 제한하는 최외각 팬케이크 권선의 외부자장의 크기와 각도를

낮추어 임계전류를 큰 폭으로 증가시켰다. 그러나 최적 공극이 설정 되었을 때 그림 6(b)의 3, 4, 5, 6번 중심부분 팬케이크 권선들은 임계전류가 감소하였다. 이는 최적 공극이 설정됨으로써 전체 임계전류가 비교적 균일해져, 선재의 효율을 높이는 결과다. 공극이 없는 경우 최외각 팬케이크 권선에 걸리는 최대 수직자장에 의해 제한되었던 임계전류의 값이 최적 공극이 설정됨으로써 28.8A에서 52.6A로 82.6% 증가하였다.

그림 6에서 각 팬케이크 권선의 75에서 80턴 사이에서 값이 떨어지는 이유는 자장의 각도가 그 부분에서 90도로 급하게 증가하기 때문이다. 즉, 각 팬케이크 권선의 75에서 80턴 사이는 수직자장이 수평자장보다 월등히 큰 부분이다. n -value에 대한 분포를 그림 7에 나타내었으며, 전체적인 패턴은 임계전류와 비슷한 패턴을 보인다. 공극이 없는 형상에서 각 팬케이크의 최대 n -value는 1번 팬케이크에서 6번 팬케이크까지 각각 7.03, 8.11, 9.23, 10.67, 12.96, 17.69이며, 최적 공극이 있는 형상에서 각 팬케이크의 최대 n -value는 1번 팬케이크에서 6번 팬케이크까지 각각 9.27, 9.49, 9.64, 9.99, 11.15, 14.19로 계산되었다. 최적 공극이 설정됨으로써 n -value도 비교적 균일하게 변화하였다.

그림 6 팬케이크 권선 각 턴의 임계전류
Fig. 6 Critical current of each turn of pancake windings

그림 7 팬케이크 권선 각 턴의 n -value
Fig. 7 n -value of each turn of pancake windings

중심자장을 결정하는 임계전류의 산정은 앞서 설명한대로 발생전계와 임계전계의 수렴도로 결정된다. 본 논문에서 임계전류는 발생전계가 임계전계의 98%~100%에 수렴하였을 때의 값으로 결정된다. 그렇기에 발생전계의 크기는 임계전류를 결정하는데 큰 중요한 제약요소이다. 그림 8(a)와 같이 공극이 없는 마그넷의 경우는 최외각 팬케이크 권선에서 최대 전계가 발생하기에 임계전류가 가장 낮다. 이 현상은 최외각 팬케이크 권선 부분에 걸리는 수직자장이 가장 크기

때문이다. 최적 공극이 설정됨으로써 그림 8(b)와 같이 전계가 1번 팬케이크 권선에서 낮아졌고, 2, 3, 4, 5번의 팬케이크 권선에서 전계는 크게 증가했다. 이것은 외부자장의 크기와 각도가 최외각 팬케이크 권선에서 낮아졌고, 다른 팬케이크 권선에서는 증가했기 때문이다. 이것은 마그넷 전체 임계전류를 제한하는 팬케이크 권선이 최외각 팬케이크 권선이 아닐 수 있다는 것을 보여준다. 이는 최적 공극이 설정됨으로써 마그넷의 효율을 높일 뿐만 아니라 성능을 크게 높일 수 있다는 것을 보여준다.

공극이 없는 형상은 최외각 팬케이크 권선에 최대로 걸리던 수직자장에 의한 임계전류 산정으로 선재의 효율성이 낮다. 그러나 최적 공극이 있는 형상은 수직자장이 모든 팬케이크 권선에 비교적 균일하게 인가되어 그림 8의 1, 2, 3, 4번 팬케이크 권선이 비교적 균일한 전계를 띄고, 비교적 균일한 임계전류를 갖게 된다. 이는 선재의 효율성을 극대화시키며 임계전류를 크게 증가시키고, 그로 인해 중심자장이 큰 폭으로 상승한다.

그림 8 팬케이크 권선 각 턴의 전계

Fig. 8 Electric field of each turn of pancake windings

각 팬케이크 권선 사이의 길이는 중심자장과 균일도를 향상시키기 위해 진화론적 방법으로 최적화했다[10]. 그 결과 표 4와 같이 각 팬케이크 권선의 개수에 따른 각 팬케이크 권선 사이의 공극 길이가 계산 되었다. 패턴을 보면 팬케이크 권선의 수가 증가할수록 중심 부분 팬케이크 권선 사이의 공극들은 거의 일정하고, 최외각 팬케이크 권선의 갭은 일정 길이에 수렴을 하고 있다. 팬케이크 권선들은 중심 부분으로 모임으로써 중심자장의 증가를 이루려는 성질과, 넓게 퍼짐으로써 인가되는 수직자장을 줄여 임계전류를 높여서 중심자장의 증가를 이루려는 성질이 있다. 이 두 가지 성질은 서로 상반되며, 중심자장을 최대로 하는 교차점이 최적점으로 계산되었다. 최외각부분의 공극길이가 일정 값으로 수렴해가는 패턴을 가짐으로, 더 많은 팬케이크 권선의 수를 사용한 형상도 적용 가능하다. 표 4에서 G_1 은 마그넷의 중심부분 팬케이크 권선 사이의 공극의 길이를 나타내고, 순차적으로 최외각부분 팬케이크 권선 사이의 공극 G_6 까지 표현하였다.

팬케이크 권선의 수를 4개부터 12개까지 2개씩 증가시키며, 각 팬케이크 권선 사이에 공극이 없는 경우와 최적 공극이 있는 경우의 임계전류와 중심자장 그리고 증가율을 표 5에 나타내었다.

임계전류와, 중심자장의 증가율은 다음 식 (6)으로 계산하였다. 식 (6)의 B_{op} 은 최적화된 형상의 중심자장을 의미하며, B_{no} 은 공극이 없는 형상의 중심자장을 의미한다.

표 4 팬케이크 권선의 개수에 따른 최적공극 길이

(단위 : mm)

Table 4 Optimal gap length at various no. of pancake windings

No. of pancake windings	Gap between pancake windings					
	G_1	G_2	G_3	G_4	G_5	G_6
4	2.9	20.6				
6	3.1	10.4	18.6			
8	3.2	6.2	11.3	16.8		
10	3.4	5.3	7.5	11.5	16.5	
12	2.6	3.2	5.4	8.4	11.7	16.5

$$Ratio(\%) = \frac{B_{op} - B_{no}}{B_{no}} \times 100 \quad (6)$$

개별적인 공극을 여러 마그넷 형상에 적용시키기 위해서 팬케이크 권선의 개수를 4개부터 12개까지 2개씩 증가시키며 계산하였고, 각 경우의 임계전류와 중심자장을 공극이 없는 경우와 최적공극이 있는 경우로 나누어 표 5에 나타내었다. 임계전류 증가율의 전체적인 패턴은 팬케이크 권선의 개수가 4개일 때 59.4%에서 팬케이크 권선의 개수가 12개일 때 82.6%로 팬케이크 권선의 수가 증가할수록 높아진다. 중심자장의 증가율의 경우 증가량만 본다면 꾸준히 증가하는 패턴을 보이지만, 공극이 없는 마그넷 형상에서 팬케이크 수가 많을수록 높은 중심자장을 형성하기 때문에 증가율은 감소하는 것처럼 보인다.

표 5 팬케이크 권선의 개수에 따른 임계전류와 중심자장

Table 5 Critical current and central magnetic field at various no. of pancake windings

		No. of pancake windings				
		4	6	8	10	12
I_c	No gap (A)	41.1	34.9	31.9	30.0	28.8
	Optimal gap (A)	65.5	60.9	57.0	55.8	52.6
	Ratio (%)	59.4	74.5	78.7	86.0	82.6
B_0	No gap (mT)	201.9	251.8	298.0	340.3	378.5
	Optimal gap (mT)	266.5	341.6	401.3	455.1	498.1
	Ratio (%)	32.0	35.7	34.7	33.7	31.6

6. 결 론

팬케이크 형태로 권선한 고온초전도 마그넷에서 공극이 없는 경우는 최외각 팬케이크 권선에서 대부분의 수직자장이 발생하기 때문에 최외각 팬케이크 권선에서 가장 높은 전계가 발생하고 이로 인해 모든 팬케이크 권선의 임계전류가 제한된다. 안쪽 팬케이크 권선부분들은 전류를 더 흘릴 수 있음에도 최외각 팬케이크 권선부분에서 결정된 임계전류로 인해 전류를 높이지 못한다.

최적 공극이 있는 경우에는 모든 팬케이크 권선에서 비교적 균일한 수직자장이 발생하기 때문에 균일한 전계를 띄게 된다. 그래서 모든 팬케이크 권선에서 비교적 균일한 임계전류가 계산된다. 최적 공극이 있는 형상은 사용된 선재의 효율성을 높이고, 임계전류와 중심자장이 크게 증가한다.

본 논문에서는 중심자장과 균일도의 향상을 목적으로 팬케이크 권선 사이에 서로 다른 공극의 길이를 진화론적 방법으로 최적화했다. 그 결과 팬케이크 권선의 수가 12개일 때, 임계전류는 공극이 없을 때 28.8A에서 최적 공극을 설정하였을 때 52.6A로 82.6%가 상승했고, 중심자장은 공극이 없을 때 378.6mT에서 최적 공극을 설정하였을 때 498.1mT로 31.6%가 상승했으며, 균일도는 3.78%에서 1.92%로 49.2%상승했다.

본 논문에서 제시한 팬케이크 형태로 권선한 고온초전도 마그넷에서 각 팬케이크 권선 사이에 최적공극을 설정하는 방법은 현재까지 알려져 있는 별도전원, 형상최적화 같은 방법들 보다 중심자장의 향상에 효과가 높다.

참 고 문 헌

- [1] C. Wang et al., "Electromagnetic optimization design of a HTS magnet using the improved hybrid genetic algorithm," *Cryogenics*, vol. 46, pp. 349-353, 2006.
- [2] M. Tsuchiya, et al., "Development of Superconducting Split Magnets for NMR Spectrometer", *IEEE Trans. Appl. Supercond.* Vol.18, no.2, pp.840-843, 2008.
- [3] Myunghun Kang, et al., "Current Estimation of an HTS BSCCO magnet Having Multiple Power Sources Based on the Field dependent E-J Relation," *IEEE Trans. Appl. Supercond.* Vol.19, no.3, pp.1257-1261, 2009.
- [4] P. E. Richens and H. Jones, "A detailed study of the design, construction and cryo-operation of an HTS magnet," *IEEE Trans. Appl. Superconduct.*, vol. 12, no. 1, pp. 1741-1746, 2002.
- [5] M. Kang, M. Koo, H. Lee, and G. Cha, "Increment of the central magnetic field of an YBCO magnet by using multiple power sources," *IEEE Trans. Appl. Superconduct.*, vol. 19, no. 3, pp. 1253-1256, 2009.
- [6] M. Kang, M. Koo, H. Lee, and G. Cha, "The effects of the air gap between pancake windings on the central magnetic field in a high temperature superconducting magnet," *Cryogenics*, vol. 50, no. 2, pp. 78-83, 2010.
- [7] Y. Jo, Y. Kwon, Y. Kim and J. Hong, "Design of high temperature superconducting magnet," *IEEE Trans. Appl. Superconduct.*, vol. 12, no. 1, pp. 721-724, 2002.
- [8] T. M. Qu, C. Gu, M.Y.Li, and Z. Han, "V-I properties and n value of degraded Bi-2223/Ag superconducting tapes," *Physica C* 426 (2005), p. 1159-1163.
- [9] H. Kumakura, A. Matsumoto, Y.S. Sung and H. Kitaguchi, "E-J characteristics of Bi-2212/Ag and

Bi-2223/Ag tape conductors," *Physica C* 384 (2003), p. 283-290.

- [10] M. Kasper, "Shape optimization by evolution strategy," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 28, no. 2, pp. 1556-1559, 1992.

저 자 소 개

김 영 민 (金榮敏)

1984년 5월 28일생, 2010년 순천향대 공대 정보기술공학부 졸업, 현재 동대학원 석사 과정.

E-mail : kymbba@sch.ac.kr

구 명 환 (具明煥)

1984년 5월 28일생, 2010년 순천향대 공대 정보기술공학부 졸업, 현재 동대학원 박사 과정.

E-mail : kunine@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

E-mail : gsoocha@sch.ac.kr

전 창 완

1963년 10월 22일생. 1986년 서울대 공대 제어계측공학과 졸업, 1996년 동대학원 제어계측공학과 졸업(박사). 현재 순천향대 전기통신공학과 전임교수.

Tel : 041-530-1372

E-mail : jeoncw@sch.ac.kr

백 경 호 (白京虎)

1972년 11월 8일생. 1999년 순천향대 공대 전자공학과 졸업. 2007년 동대학원 전자공학과 졸업(박사). 현재 순천향대 전기통신공학과 계약교수.

E-mail : pkhtow@hitel.net