

팬케이크 권선의 권선수가 고온초전도 마그넷의 중심자장에 미치는 영향

강명훈, 이광연, 이용석, 차귀수, 이희준
순천향대학교

Effect of Number of Turns of Pancake Windings
on Central Magnetic Field of the HTS Magnet

Myung Hun Kang, Kwang Youn Lee, Yong Seok Lee, Gueesoo Cha, Hee Joon Lee
Soonchunhyang university

Abstract - Pancake windings have merits that are easier to make high field magnets and replace windings when an accident happens and windings are aged. The current of the whole magnet consisted of windings connected in series was limited by the minimum current of the top and bottom pancake windings where maximum perpendicular magnetic field was applied.

This paper propose a optimal design of a HTS magnet excited by a single source, where evolution strategy was adopted for optimal design algorithm. A magnet consisted of 8 BSCCO pancakes was chosen to prove the effectiveness of this optimal design method. Magnetic field at the center of a magnet was chosen as the object function and it was used maximized.

Results of the optimal design shows that the increment of the number of turns of the pancake winding make the magnetic field of the center of the magnet increase but the current of the winding decrease for the larger perpendicular magnetic field.

1. 서 론

고온 초전도 선재의 특성이 향상됨에 따라 고온초전도 선재를 이용한 초전도변압기, 한류기, 초전도에너지 저장장치(SMES) 및 각종 고자장 실험용 마그넷이 개발되고 있다. [1] 일반도체를 이용하여 마그넷을 제작할 때에는 선재의 비자성 특성으로 인하여 외부자장에 의한 전류제한은 없으나, 전류밀도가 낮기 때문에 자장을 높이는 것은 어렵다. 반면에 초전도 선재를 이용하여 마그넷을 제작할 때에는 상대적으로 전류밀도가 크기 때문에 자장을 높일 수 있는 장점이 있지만, 외부자장에 의해 임계전류가 감소하기 때문에 흐를 수 있는 전류용량이 제한된다.

본 논문에서는 비결정론적 최적화 설계법 중의 하나인 진화론적 방법을 사용하여 팬케이크 권선이 적층된 구조를 갖는 고온초전도 마그넷의 중심자장을 최대화 할 수 있는 전류용량을 결정하였다. [2], [3] 또한 마그넷의 총 권선수를 달리하여 최적설계를 수행하였다. 자성체가 없는 마그넷의 구조를 고려하여 최적설계를 수행하는 과정에서 목적함수인 중심자장의 계산에는 비오사바르 법칙을 사용하였다.

2. 해석모델

테이프 형태의 BSCCO 고온초전도 선재는 외부자장이 가해지면 임계전류 값이 감소하게 된다. 특히 외부자장이 수직으로 인가한 경우 임계전류가 큰 쪽으로 감소한다. 따라서, 임의의 방향으로 가해진 자장에 대한 초전도 선재의 임계전류 산정은 수직방향 자장성분의 크기에 의해 결정된다. 그림 1은 본 연구에서 사용된 BSCCO 선재에 수직외부자장이 가해질 때 임계전류의 감소 정도를 나타낸다.

권선이 직렬로 연결된 마그넷의 전류는 수직자장이 최대로 가해지는 최외각 팬케이크 권선의 전류에 의해 제한된다. 권선에 가해지는 자장의 자속선도는 그림 2와 같다.

계산에 사용된 마그넷은 그림 3과 같이 팬케이크 권선이 적층된 구조이다. 권선부분의 반경길이는 절연물의 두께를 고려하여 산정하였다. 본 연구에 사용된 선재는

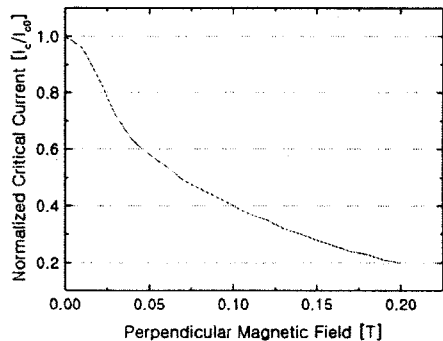


그림 1 BSCCO 고온초전도 선재의 Ic-B(수직)

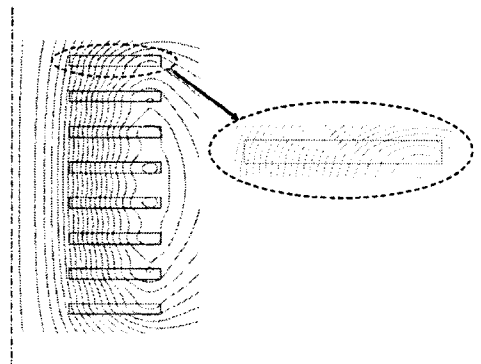


그림 2 고온초전도 마그넷의 자속선도

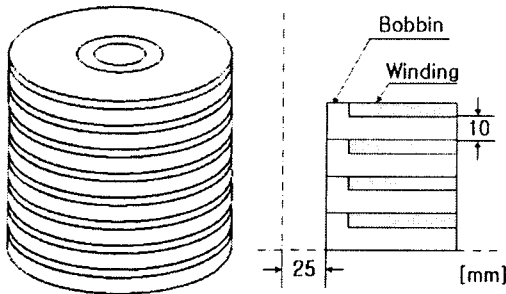


그림 3 계산모델의 구조

표 1 고온초전도선재의 사양

분류	값
임계전류	126 A
선재 폭	4.4 mm
선재 두께	0.285 mm
절연지 두께	0.1 mm

AMSC사에서 제작된 High Strength Plus Wire로 양쪽 면이 stainless steel 로 강화된 구조로 되어 있으며 선재의 사양은 표 1과 같다.

3. 진화론적 방법

자성체가 없는 구조의 마그넷의 중심자장과 선재부분에서의 수직자장은 자유공간에서의 직류 전류소에 의한 자계를 계산하는 데 사용하는 식 (1)과 같은 비오사바르 법칙을 사용하여 계산하였다.

$$\vec{H} = \oint \frac{Id\vec{L} \times \vec{a}_R}{4\pi R^2} \quad (1)$$

HTS 마그넷의 팬케이크 권선에 흐르는 전류를 계산하는 최적화 방식으로는 genetic algorithm과 simulated annealing을 합성한 방법으로 비결정론적 방법 중에서 수렴특성이 가장 빠른 (1+1) 진화론적 방법을 사용하였다. 본 설계에서는 마그넷의 중심자장을 목적함수로 설정하고 이것이 최대화 되도록 하였다. 설계변수로는 팬케이크 권선의 인가전류를 설정하였다. 권선의 전류는 자기자계 하에서 측정된 선재의 임계전류를 초과하지 않도록 하였으며, 선재에 가해지는 자장은 측정된 B-I곡선에서 결정된 허용전류에 대한 자장을 초과하지 않도록 하였다. 위와 같은 부등호 제약조건을 정리하면 다음과 같다.

$$1) B_{i,1} (\text{수직자장}) \leq B_c (B-I \text{ 곡선상의 허용 수직자장})$$

여기서, $B_{i,1}$ 와 B_c 는 각각 인가전류에 의해 선재에 가해지는 수직자장과 B-I 곡선상의 허용수직자장을 나타낸다.

4. 최적화 수행 결과

최적화 수행을 위한 총권선수는 각각 600, 800, 1000, 1200 및 1400턴으로 계산하였다. 그림 4는 팬케이크 권선의 총권선수 변화에 따른 전류의 수렴과정을 나타낸다. 그림 4에서 X축과 Y축은 최적화 과정의 세대수와 권선의 전류를 나타낸다. 서로 다른 턴 수를 갖는 권선 전류는 모두 30세대 이전에 수렴하였으며, 이는 FEM을 이용한 수치해석의 반복 수행보다 비오사바르 법칙을 사용한 계산결과가 훨씬 빠르다는 것을 나타낸다. 권선수가 증가함에 따라 외부자장의 증가로 인하여 팬케이크 권선에 흐를 수 있는 허용전류가 낮아진다.

그림 5는 팬케이크 권선의 총권선수 변화에 따른 중심자장의 수렴과정을 나타낸다. 권선수가 증가함에 따라 외부자장의 증가로 인해 팬케이크 권선에 흐를 수 있는 허용전류가 낮아지며, 중심자장은 증가함을 알 수 있다.

그림 6은 팬케이크 권선의 총권선수 변화에 따른 최대 수직자장과 허용전류의 변화를 나타낸다. 사각형기호와 원형기호는 각각 허용전류 값과 최대 수직자장 값을 나타낸다. 권선수의 증가에 따라 선재에 가해지는 수직자장의 값은 증가하며, 그로 인한 허용전류의 값은 감소함을 알 수 있다. 그림 6에서 알 수 있듯이, 권선수의 증가에 따른 수직자장과 허용전류 값의 추이는 비선형적임을 알 수 있다.

그림 7은 팬케이크 권선의 총권선수 변화에 따른 전류와 중심자장의 변화를 나타낸다. 사각형기호와 원형기호는 각각 권선 전류 값과 중심자장 값을 나타낸다. 권선수의 증가에 따라 마그넷의 중심에서 발생하는 자장 값은 증가하나, 흐를 수 있는 전류 값은 감소함을 알 수 있다. 그림 7에서 알 수 있듯이, 권선수의 증가에 따른

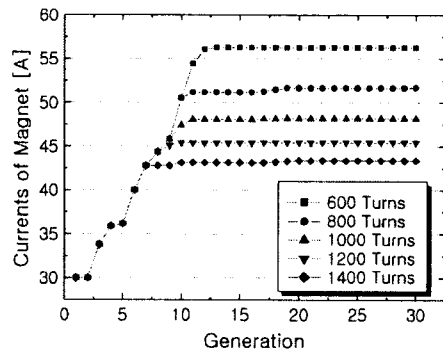


그림 4 권선수에 따른 전류의 수렴 비교

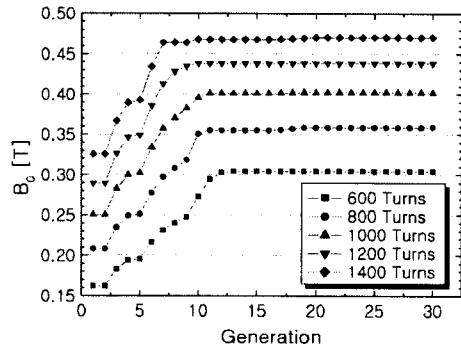


그림 5 권선수에 따른 중심자장의 수렴 비교

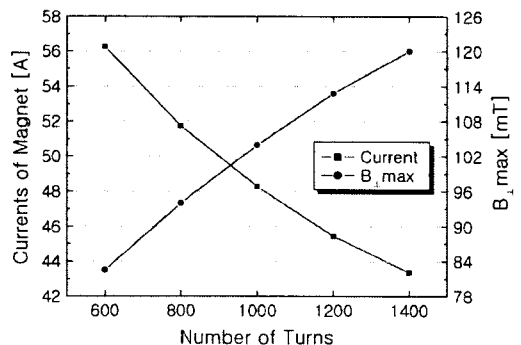


그림 6 권선수에 따른 수직자장과 허용전류

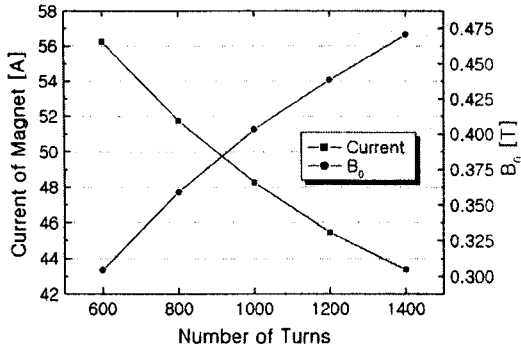


그림 7 권선수에 따른 전류와 중심자장

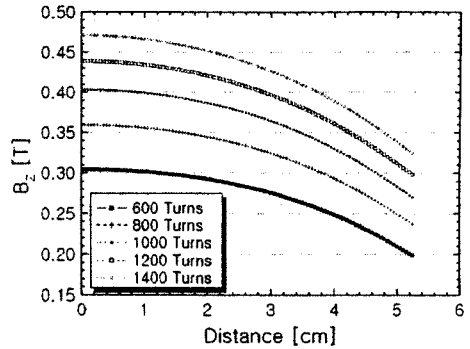


그림 9 권선수에 따른 축방향 자장의 변화

전류와 중심자장 값의 추이는 비선형적이며, 마그넷 설계시 이를 고려하여야 한다.

그림 8은 팬케이크 권선의 총권선수 변화에 따른 선재길이와 중심자장의 변화를 나타낸다. 사각형 기호와 원형기호는 각각 마그넷의 총권선 길이와 중심자장 값을 나타낸다. 마그넷에 사용된 총권선의 길이는 총권선수가 증가함에 따라 증가폭이 점차 커진다. 반면에 중심자장의 값은 총권선수가 증가함에 따라 증가폭이 점차 작아진다. 따라서 중심자장을 증가시키기 위한 마그넷을 설계할 때 총권선수의 증가에 의한 선재 길이의 증가를 고려해야 한다.

그림 9는 팬케이크 권선의 총권선수 변화에 따른 마그넷 중심에서의 축방향 자장의 변화를 나타낸다. 그래프에서 알 수 있듯이 마그넷 중심에서 축방향으로 갈수록 감소하는 자장은 권선수의 변화에 무관하게 감소폭이 유사하다. 마그넷의 중심에서 10mm 떨어진 지점의 축방향 자장의 감소폭은 약 1% 이내임을 알 수 있다.

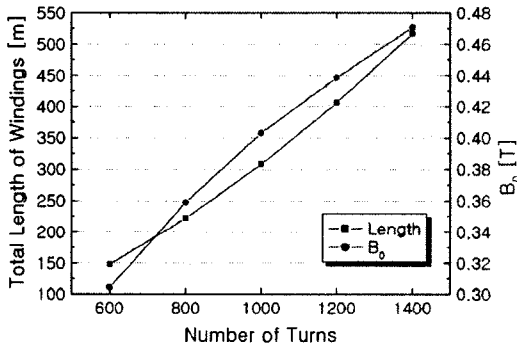


그림 8 권선수에 따른 선재길이와 중심자장

5. 결 론

본 논문에서는 비오사바르 법칙과 진화론적 방법을 사용하여 팬케이크 구조를 갖는 HTS 마그넷의 최적화 설계방법을 제시하였다. 마그넷의 최적화 설계시 목적함수와 설계변수로는 각각 마그넷의 중심자장과 팬케이크 권선의 전류를 사용하였다. 진화론적 방법을 사용한 마그넷의 중심자장과 전류 값은 모두 30세대 이내로 빠르게 수렴하였다. 팬케이크 권선의 권선수 변화에 따라 선재에 가해지는 수직자장이 변화하며, 그로 인해 마그넷의 허용전류와 중심자장이 변화함을 알 수 있었다. 또한, 마그넷의 총권선수를 증가시킬 경우 중심자장이 비례적으로 증가하지 않음을 알 수 있었다.

본 연구는 한국과학재단 특장기초연구 (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 High Field Insert Magnet for NMR," IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol.5, No.2, pp.234-237, 1995.
- [2] K.Preis, et al., "FEM and Evolution Strategies in the Optimal Design of Electromagnetic Devices," IEEE Trans. on Magnetics, Vol.27, No.5, pp. 2181-2183, 1990.
- [3] M. Kasper, "Shape Optimization by Evolution Strategy," IEEE Trans. on Magnetics, Vol.28, No.2, pp.1556-1559, 1992.