

2T급 전도냉각 고온 초전도 자석의 설계

심기덕 김석호 손명환 민지현
한국전기연구원 초전도응용연구그룹

Design of 2T conduction cooled HTS magnet

K.D.Sim, S.H.Kim, M.H.Sohn, C.H.Min
Superconducting Devices & Cryogenics Research Group, KERI

Abstract - A 2.0T class HTS conduction cooled magnet was designed. Designing of magnet shape was performed through two steps. First step is to find a basic cross section for minimize the amount of conductor used and second step to optimize the coil shape to satisfy the magnetic field homogeneity. The magnetic fields was analyzed with FEM and the critical current value of magnet was also expected with the result of field analysis and the Ic to B curve of Bi-2223 HTS tape.

1. 서 론

고온 초전도 선재의 개발에 힘입어 이 선재를 사용하는 응용분야에 대한 연구 또한 활발하다. 그러나 1세대 고온 초전도 선재로 불리는 Bi-2223의 경우 액체질소 온도에서는 주변 자기장에 의한 임계전류 저하가 심하여 자석으로서의 용용에 제한을 받는다. 그래서 극저온 냉동기를 사용하여 운전 온도를 낮추어 선재의 임계전류를 배가시키는 물론 자기장 따른 임계전류 저하 특성을 개선시키는 방법이 제안되고 있다. 그러나 이러한 전도냉각형 초전도 코일 개발에는 열적인 안정성을 주의 깊게 고려해야 하며 이를 위해 초전도 선재의 임계전류 값의 저하를 고려한 운전전류의 선택이 필수적이다. 본 논문에서는 코일의 임계전류 저하에 대한 해석을 중심으로, 냉동기 직결형 2T급 고온 초전도 자석의 설계 방법에 대해 다루었다.

2. 본 론

2.1 마그네트 형상 설계

2.0T의 중심 자기장을 발생시키는 고온 초전도 마그네트를 설계하였다. 코일의 형태는 여러 개의 double pancake sub-coil을 적층한 형태로 현재 상용화 되어 있는 2*3T급 상용 bore형 물성측정용 고온초전도 마그네트와 유사한 형태와 사양을 갖도록 하였으며 이에 대한 기본 사양은 아래의 표1과 같다. 코일은 내측직경을 고정된 상태에서 중심자장과 자장균일도가 목적값에 갖도록 각 sub-coil의 권선수를 결정하는 방법으로 설계한다.

<표 1> 고온 초전도 마그네트 사양

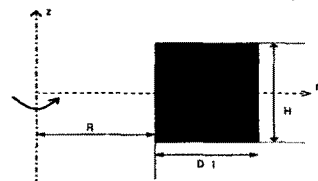
항목	사양
중심자장	2.0T
중심에서의 자장 균일도	수% @ 10mm DSV
사용선재	HTS tape 4.5mm x 0.3mm Ic=130A
코일 형태	double pancake 적층형
double pancake 개수	10~15
내측 직경	100mm

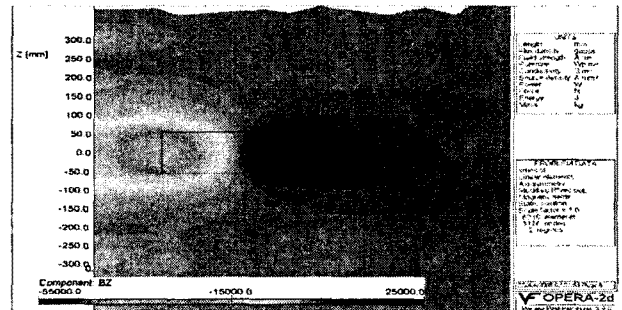
2.1.1 초기 형상 설계

초기 설계 과정에서부터 너무 복잡한 형태를 설정할 경우 최적해를 찾지 못하는 경우가 있을 수 있으므로 본 초전도 마그네트의 최적설계는 2단계로 나누어 진행되었다. 1차설계는 아래의 <표2>에 정리된 바와 같이 중심 자장 2.0T를 발생시키면서 최소의 선재 소요량을 갖게 하는 솔레노이드형의 마그네트를 설계하는 것이다. 이 과정을 통해 얻어진 형상은 중심에서 균일한 자장을 갖는 double pancake 적층형 마그네트의 초기 형상으로 사용된다.

임의의 초기형상에서 해석이 시작되어 최소의 선재를 사용하면서 중심자장 2.0T를 발생시키는 마그네트의 형상이 결정되었다. 결정된 마그네트 형상에 대한 전자기장 해석 결과 중 z축 방향의 자기장 분포를 그림 1에 나타내었다. 전자기장 해석은 OPERA-2d를 사용하였으며 최적화 과정은 유전알고리즘을 적용하였다.

<표 2> 초기형상 설계를 위한 모델 및 설계 파라미터

모델	
설계 변수	· D1: Width of coil · H : 1/2 Height of coil · Current dens : 운전전류 밀도=100A/mm2 · R : 50 mm 고정
목적함수	· 권선 부피 최소화 = 소요 선재량 최소화
제한 조건	· 20,000 < Center field [gauss] < 21,000
가정	· HTS tape의 폭 : 4.5mm · HTS' tape의 두께 : 0.5mm · Double pancake 두께 =9mm

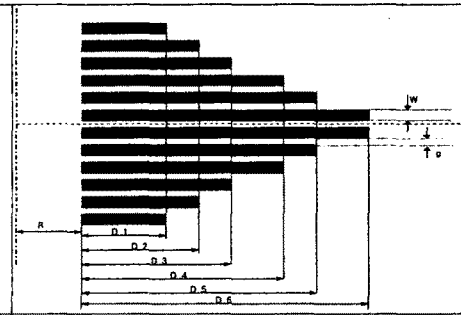


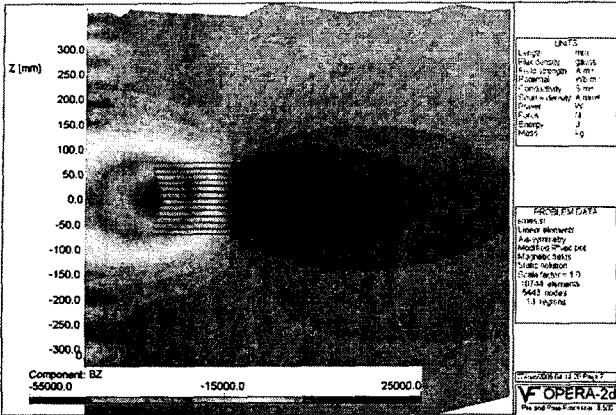
<그림 1> 초기 형상설계 결과에 대한 전자기장 해석

2.1.2 최적 형상 설계

1차 설계에서 얻어진 형상 데이터틀 기초로 2차 설계를 수행하였다. 2차 설계는 총 12개의 double pancake가 적층되어 있는 구조에 대해, 마그네트 중심 주변의 자장 균일도가 최소화 되는 목적으로 설계를 진행하였다. 설계와 관련한 목적함수 및 제한 조건들을 아래 <표3>에 수록하였으며 전자기장 해석 결과 중 z축 방향 자장을 <그림2>에 나타내었다.

<표 3> 최적형상 설계를 위한 모델 및 설계 파라미터

모델	
설계 변수	· D1~D6: 각 double pancake의 코일 폭 · Current dens : 130A/mm ² 으로 고정 · R : 50 mm 고정 · W, g : 고정
제한 조건	· 18,000 < Center field [gauss] < 22,000
목적 함수	· 반경 r 상의 field points에서의 자장균일도 최소화 = (max min)/center field * 100 [%]



<그림 2> 최적설계 형상 및 전자장해석 결과

아래 <표 4>는 pancake 적응형 고온초전도 마그네트의 형상 설계 결과를 정리한 것이다.

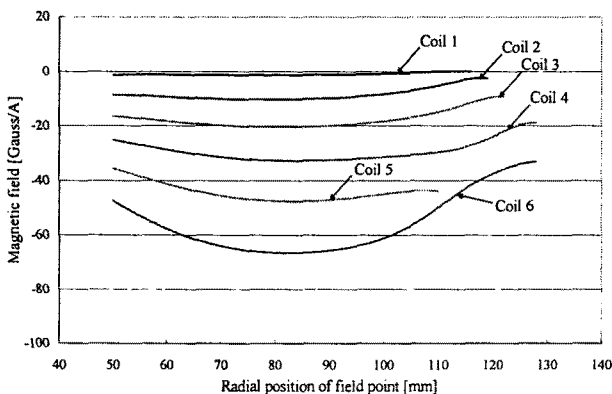
<표 4> 마그네트 이 형상설계 결과

	double pancake number	inner radius (mm)	Width [mm]	outer radius (mm)	double pancake 두께	double pancake 간 gap	No. of turns
형상	6	50	78	128	10 mm	2 mm	156
	5		60	110			120
	4		78	128			156
	3		72	122			144
	2		69	119			138
	1		66	116			132
	1-1		66	116			132
	2-1		69	119			138
	3-1		72	122			144
	4-1		78	128			156
	5-1		60	110			120
	6-1		78	128			156
전자 기척 특성	총 선재 소요량		1830 m				
	운전전류 밀도		130A/mm ²				
	center filed		21,228 Gauss				
	Homogeneity		10mm DSV	평균 3.7%			

2.2 마그네트의 임계전류 예측

고온초전도 선재의 임계전류는 선재에 인가되는 자기장에 의해 저하되는 데 선재의 면에 나란한 방향의 자장보다는 선재 면에 수직으로 인가되는 자기장에 의해 더 큰 저하 특성을 보인다. 본 논문에서는 수직자장에 의한 임계전류 저하특성을 주로 고려하였다.

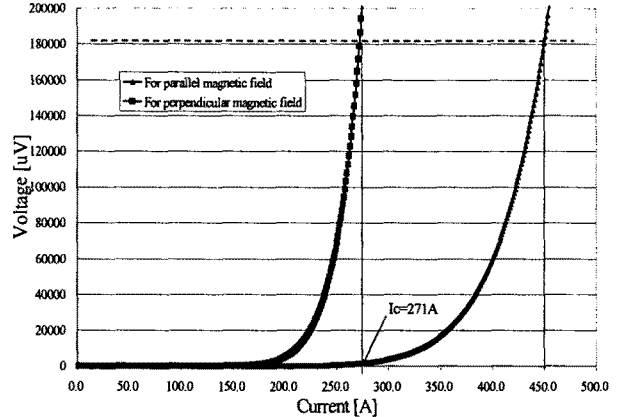
형상 설계된 마그네트에 대해 운전온도인 20K에서의 임계전류를 예측하기 위해 마그네트의 각 turn에서의 단위 전류당 인가 자기장을 계산하였으며 <그림 3>은 각 sub-coil에서 선재의 넓은 면에 수직으로 인가되는 자기장의 새기를 나타낸다. 자기장에 의한 선재의 임계전류 저하율은 AMSC사의 hermetic 선재의 특성을 적용하였다.[1] 계산된 자기장을 임계전류 저하 특성 곡선에 적용하여 각 turn에서의 전류대 전압곡선(Ic curve)을 얻어내고 이를 전체 마그네트에 대해 합산하는 방법으로 마그네트에 대한 전류대 전압곡선을 계산하여 마그네트의 임계전류를 예측한다. 선재의 index value 는 17로 고정하였다.



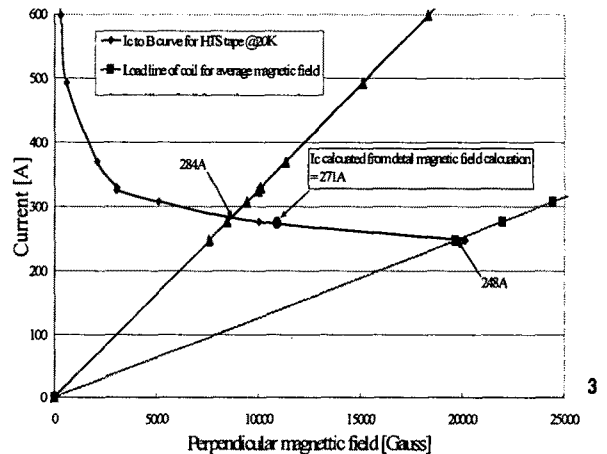
<그림 3> 각 Sub-coil에서의 수직방향 자기장

<그림 4>는 계산된 마그네트의 전압 대 전류특성 곡선을 나타낸다. 수직 자장에 의한 임계전류 저하가 수평자장에 의한 저하보다 크게 나타남을 알 수 있다. 예측된 마그네트의 임계전류는 1uV/cm criteria에서 271A이다.

<그림 5>는 마그네트의 평균 자기장과 최대 자기장을 사용하여 마그네트의 임계전류를 추정한 그래프이다. 단위 전류에 대한 마그네트의 자기장을 계산하고 여기에 전류를 곱하여 마그네트의 load line을 그린다. 이 load line과 선재의 자장 대 임계전류 곡선이 교차하는 점이 마그네트의 임계전류이다. 이 방법은 각각 평균자장과 최대자장을 코일 전체가 경험하고 있다고 가정하는 것으로서 실제와는 다른 결과를 발생시킬 수 있다. 평균자장에 의한 임계전류는 284A 그리고 최대자장에 의한 임계전류는 248A이다.[2]



<그림 4> 마그네트의 전압대 전류곡선 및 임계전류



<그림 5> 마그네트의 load line과 임계전류

결론

- 중심자장 2.0T를 발생시키는 고온 초전도 마그네트의 형상에 대한 최적 설계를 수행하였다.
- 20K에서의 운전을 가정하고 마그네트의 임계전류를 예측하였으며 계산된 결과는 271A로서 선재 임계전류(750A)의 36% 수준이다.
- 50%의 안전율을 고려할 경우 마그네트의 운전전류는 130A 수준이 되어야 할 것이다.
- 수직자장만을 고려하여 마그네트의 임계전류를 예측해도 결과에는 큰 차이를 발생시키지 않는다.
- 마그네트의 평균자장 혹은 최대자장만을 사용하여 임계전류를 예측할 때는 좀더 세심한 주의가 필요할 것으로 사료된다.

본 연구는 과학기술부 지원의 한국전기연구원 기본연구사업비로 수행되었습니다.

[참고 문헌]

[1] M.A.Young, "Measurement of the performance of BSCCO HTS tape under magnetic fields with a cryocooled test rig", IEEE Transaction on applied superconductivity, Vol. 13, No. 2, June 2003
 [2] Y. Wolfus, "Estimation of the critical current of BSCCO coils based on the field dependent I-V curves of BSCCO tapes", Physica C, 2004