

5 T급 고온초전도마그넷의 설계 및 제작

Design and Fabrication of 5 T HTS Insert Magnet

구명환^{1,2}, 김동락^{1,*}, 최연석¹, 차귀수³

M.H. Ku^{1,2}, D.L. Kim^{1,*}, Y.S. Choi¹, G.S. Cha³

Abstract: The critical current of the HTS(High Temperature Superconductor) tape is governed by cooling temperature, magnetic field and its angle to HTS tape originated from its geometrical structure. At the HTS coil design stage, the critical current of the coil is calculated by considering the I_c - B characteristics of the 2G tape and the operating current is determined based on the critical current. The operating current and the structure of the 5 T coil are suggested through the FEM (Finite Elements Method) analysis and calculation. As a part of our on-going research on a 20 T LTS/HTS magnet, we have designed and constructed a 5 T HTS insert coil and tested it in liquid helium temperature.

Key Words: double pancake coil, HTS, LTS, perpendicular field.

1. 서 론

MRI나 NMR 등 수 테슬라 이상의 자기장을 발생 하는 마그넷은 NbTi, Nb₃Sn과 같은 저온 초전도선재를 이용하여 제작되는 것이 일반적이다. 초전도선재는 구리선재를 이용한 상전도 마그넷에 비해서 전류밀도가 크고 에너지 손실이 없어 마그넷의 부피를 줄일 수 있으며 20 테슬라 이상의 고자기장 초전도마그넷을 제작할 수 있다.

저온 초전도선재를 이용한 초전도마그넷은 NMR용으로 1 GHz 급(23.5 T)이 상용화되어 있다[1]. 바이오 연구분야에서는 높은 분해능의 단백질체 구조분석 등의 연구를 위하여 1.2 GHz 급 이상의 고자기장 NMR을 필요로 하며 이에 따라서 28 T 또는 30 T 급의 고자기장 마그넷의 개발이 요청된다. 현재 저온 초전도선재로서 발생할 수 있는 자기장은 ~23 T 정도로 제한되어 있으며 그 이상의 고자기장 발생을 위해서는 고자기장에서 전류특성 (I_c - B)이 우수한 고온 초전도선재로서만이 가능하다[2].

본 논문에서는 외측 전도냉각형 15 T 저온초전도마그넷과 내측 고온초전도마그넷으로 구성되는 20T 급의 초전도 마그넷의 설계에서, 2G HTS 선재로 제작되는 5 T 급 내측 고온초전도마그넷의 설계와 제작에 대해서 연구하였다.

2. 본 론

2.1. 해석모델-2G HTS 선재

초전도 선재는 저온초전도 선재와 고온초전도 선재로 구분된다. 저온초전도 선재에는 NbTi, Nb₃Sn 등이 있으며, 본 연구의 외측마그넷에 사용되었다. 고온초전도 선재는 1세대(1G) 선재와 2세대(2G) 선재로 구분되며, 본 연구의 내측마그넷은 ReBCO 계열의 2세대 선재가 사용되었다. 해석에 사용된 고온초전도 선재의 임계전류는 77 K에서 외부자장이 인가되지 않을 때 80A이고, 실제 동작 온도인 4.2 K에서는 액체 질소 온도에서 보다 약 15 배 높은 임계전류를 갖는다. Table 1 에 계산에 이용된 2G 초전도 선재의 사양을 나타내었다[3].

고온초전도 선재는 폭 4 mm, 두께 0.1 mm 로서 납작한 모양의 테이프 형태로 되어있어 초전도 선재에 인가되는 자기장에 의해서 임계전류가 이방성을 가진다[4]. 선재의 넓은 면을 기준으로 수직으로 인가되는 자장을 수직자기장, 수평으로 인가되는 자장을 수평자기장이라 한다. 고온 초전도선재의 임계전류는 외부 자기장에 의해 선재에 인가되는 수직자기장의 영향을 받아 감소된다. 따라서 본 연구에서는 내측마그넷에 인가되는 수직자장의 크기를 고려하여 임계전류를 산정하였다.

Fig. 1 에 4.2 K에서 2G HTS 선재의 수직자장에 따른 임계전류의 특성을 나타내었다. 그림의 점으로 나타난 부분은 선재 제작사[3]에서 제공하는 데이터이고, 곡선은 데이터를 수식으로 표현하기 위하여 보간한 것이다. 보간된 곡선의 수식은 식 (1)과 같다.

$$I_c = 462.18 \times B_{\perp}^{-0.481} \quad (1)$$

Table 1. Specification of 2G HTS wire.

HTS wire	2G HTS (ReBCO)
Critical current [A]	80A (@ 77K, self field) 1200A (@4.2K, self field)
width [mm]	4
thickness [mm]	0.1
min. bending dia. [mm]	11

¹정 회 원 : 한국기초과학지원연구원 물성과학연구부

²학생회원 : 순천향대 대학원 전기공학과 박사과정

³정 회 원 : 순천향대 전기공학과 교수

*교신저자 : dlkim@kbsi.re.kr

원고접수 : 2012년 08월 13일

심사완료 : 2012년 09월 25일

게재확정 : 2012년 09월 25일

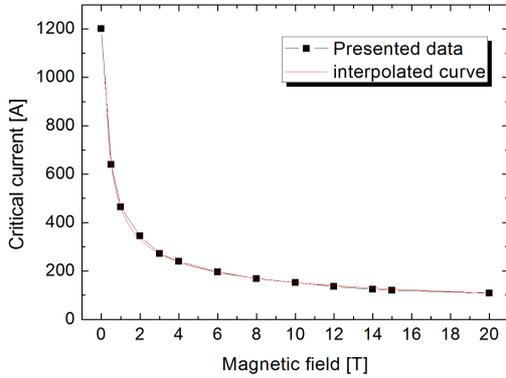


Fig. 1. I_c - B_{\perp} characteristics of 2G HTS wire used to modeling.

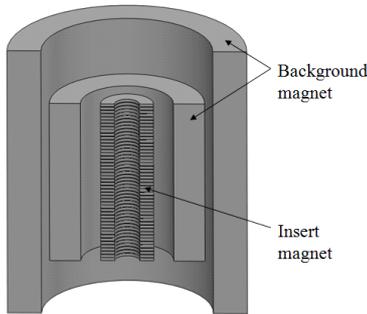


Fig. 2. Shape of superconducting magnet composed of outer LTS and inner HTS magnet.

2.2 해석모델-초전도마그넷

5 T급 고온초전도 마그넷은 15T를 발생하는 외측 마그넷의 자기장 안에서 동작한다. 따라서 내측마그넷의 설계는 외측마그넷의 형상을 고려하여야 하고, 이로 인해 마그넷의 높이와 외경이 제한된다. 외측마그넷은 NbTi 마그넷과 Nb₃Sn 마그넷으로 구성되어 있다. 외측마그넷의 안쪽 Nb₃Sn 코일의 높이는 240mm, 바깥쪽 NbTi 코일의 높이는 400 mm이며, 상온보아 직경은 102 mm이다. 내측 고온초전도 마그넷의 내경은 35mm이고 외경은 74mm이다[5]. 고온초전도마그넷의 외경은 저온용기 액체헬륨조 내경 80mm를 고려하였고, DPC(Double Pancake Coil) 보빈과 축정선, 전원공급선 등을 고려하여 벽과의 사이에 3 mm의 틈을 두었다. 높이는 최대 239mm로 외측 마그넷의 가장 낮은 높이인 240mm를 넘지 않도록 하였다. 이는 내측마그넷이 외측마그넷 보다 클 경우 내측마그넷에 인가되는 수직자기장이 증가하기 때문이다. 내측 고온초전도마그넷의 높이는 DPC의 갯수에 의해 결정되는 것으로 최대로 24 개의 DPC를 사용하는 것이 가능하다. Fig. 2에 마그넷의 단면을 나타내었다.

3. 해석 결과

유한요소해석을 통하여 초전도 마그넷의 임계전류와 중심자기장을 계산하였다. Fig. 3은 축대칭 모델의 단면을 자장의 분포와 함께 나타낸 것이다. (a)는 마그넷에 발생하는 전체 자장의 분포를 나타낸 것이고 (b)는 수직자기장의 분포만을 나타낸 것이다. (a)에서의 자장은 마그넷의 중심 축 주변에 분포하는 반면 (b)에서의

Table 2. Summary of (LTS+HTS) magnet system.

	insert magnet	outer magnet	
S.C. wire	2G HTS	Nb ₃ Sn	NbTi
inner dia. [mm]	35	130	240
outer dia. [mm]	74	217	335
height [mm]	최대 239	240	400
winding	DPC	solenoid	solenoid
turn	260 / DPC	10628	24442

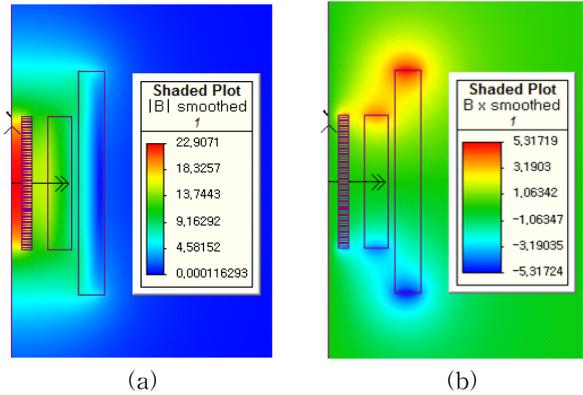


Fig. 3. Magnetic field of 20 T class (LTS + HTS) magnet system. (a) total magnetic field, (b) perpendicular component of magnetic field.

수직자장은 마그넷의 위, 아래에 집중되는 것을 알 수 있다. 초전도 선에 인가되는 자장에 대해 이방성을 가지는 내측마그넷의 경우 수직자기장이 집중되는 위, 아래 DPC에서 마그넷의 임계전류를 제한하게 된다.

Fig. 4에 내측 고온초전도마그넷의 DPC 개수 변화에 따른 최상위 DPC에 인가되는 수직자기장을 보였다. 수직자기장의 크기는 DPC가 10개일 때 3.23 T이고 24개일 때 3.72 T로 증가한다.

따라서 최대 수직자기장이 발생하는 최외각 DPC 턴의 위치도 변화하게 된다. DPC가 10개일 때의 최대 수직자장은 최외각 DPC의 66번째 턴에 인가되고 24개일 때는 83째 턴에서 발생한다. 이는 마그넷의 형상 변화에 따라 자기장의 크기와 수직자기장의 각도가 변하기 때문이다.

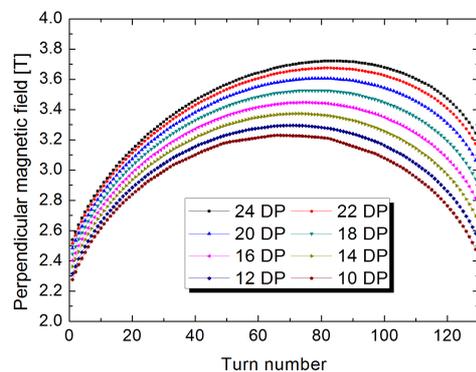


Fig. 4. Perpendicular field of HTS insert depends on the number of DPC.

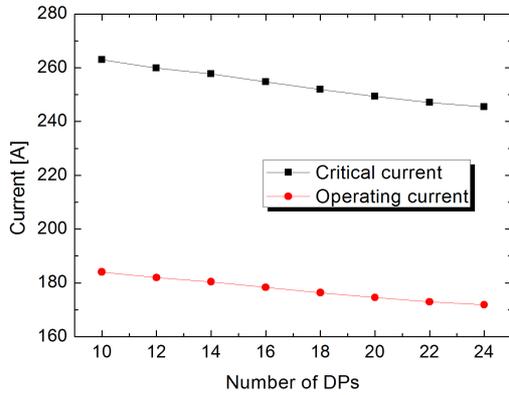


Fig. 5. Critical current of HTS insert magnet depends on the number of DPC.

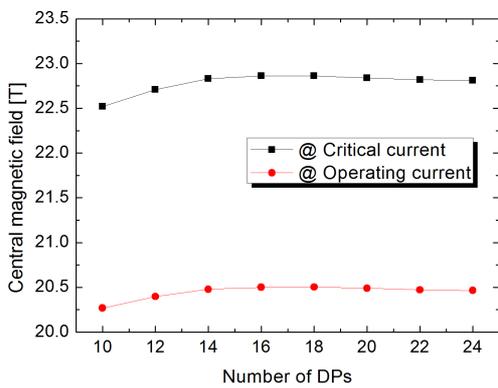


Fig. 6. Maximum magnetic field depends on the number of DPC.

Fig. 5에 DPC 개수의 변화에 따른 임계전류와 운전전류의 크기를 나타내었다. 임계전류는 수직자장의 크기에 의해 결정되는 것으로 수직자장은 DPC가 가장 작은 10개일 때 최대가 되고, DPC가 24개일 때 최소가 된다. DPC 개수가 10개일 때와 24개일 때의 임계전류의 크기는 각각 262.9 A, 245.5 A이다. 운전전류는 마그넷의 안정성을 고려하여 임계전류의 70%로 계산하였다.

임계전류와 운전전류 여자 시 DPC 개수 변화에 따른 중심자기장 크기를 Fig. 6에 나타내었다. 중심자기장은 DPC의 개수가 증가할 때에 서로 상반되는 두 가지 영향을 동시에 받게 된다. 하나는 임계전류 감소에 의한 중심자기장 감소 요인이고 다른 하나는 턴 수의 증가에 의한 중심자기장 증가 요인이다. 본 모델 해석에서는 18개의 DP일 때에 중심자기장이 최대가 되고, 운전전류는 여자 할 때 20.5 T로 목표자장 20 T(내측 5T + 외측 15T)를 만족하는 형상임을 알 수 있다.

4. HTS insert 제작 및 실험

4.1. 고온초전도 코일 제작

본 연구에서는 앞 절의 모델 해석에서 얻어진 결과를 기반으로, 16개의 DPC로서 구성된 5 T급 고온초전도마그넷을 설계하고 제작하였다. 2G 고온초전도선재[6]는 (주)서남에서 제작된 GdBaCO 선재를 사용하였다. GdBaCO 선재는 YBCO 선재가 자기장 하에서 급

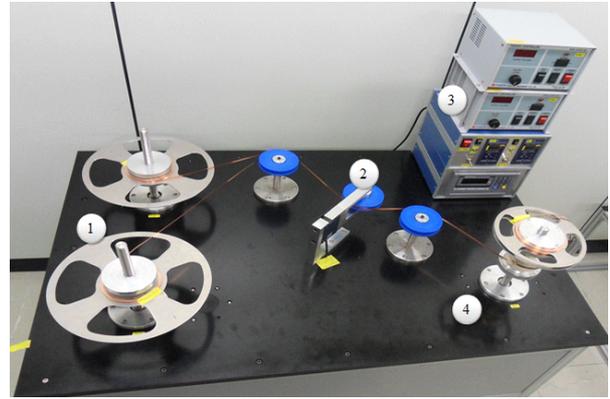


Fig. 7. HTS winding machine developed by KBSI. ① reels for HTS and Cu tape, ② load cell for tension control, ③ control system for winding speed and tension, ④ reel for winding DPC.

격히 I_c 가 감소하는데 비해 더 좋은 I_c 특성을 보인다 [7]. 고온초전도 코일은 G10 재질의 보빈에 권선되었다. 외측 LTS 마그넷의 내경을 고려한 내측 HTS insert coil을 냉각하기 위한 헬륨용기의 내경이 80 mm 인 점을 고려하고, 제작된 DPC 들을 조립하여야 하는 점을 고려하여 G10 보빈에 폭 4.1 mm, 두께 0.1 mm 의 HTS 선재를 층간 절연을 하지 않고 두께 0.1 mm 의 Cu 테이프를 안정층으로 동시에 권선하는 방식으로 내경 35 mm, 외경 74 mm 의 DPC 를 제작하였다. DPC에 전극을 부착한 후 최외층은 stainless steel 테이프로서 보강하였으며 완성된 DPC의 외경은 77 mm이었다. Cu 테이프 안정층은 켈치가 발생하였을 때 열에너지의 확산을 원활하게 하며 또한 전류의 by-pass 역할을 한다. stainless steel 테이프는 전자기력에 의한 DPC의 변형을 막는다. DPC 권선을 위하여 권선속도와 선재의 장력제어가 가능하며 2G 선재와 Cu 테이프를 동시에 권선할 수 있는 전용 권선기를 개발하였다(Fig. 7). Table 3에 HTS insert coil의 주요 값들을 보인다.

Fig. 8에 제작된 DPC와 16개의 DPC가 조립된 HTS insert를 보인다. HTS insert의 가운데에 Hall 센서를 설치하여 자기장을 측정하였다.

Table 3. Design summary of 5 T HTS insert magnet.

Parameters	
HTS Tape	
Width [mm]	4.1
Thickness [mm]	0.1
I_c (@ 77 K, self field) [A]	> 100
Coil dimension	
# of DP coils	16
# of turn per pancake	94
Inner diameter [mm]	35
Outer diameter [mm]	74
Height [mm]	176
Overall height [mm]	198
HTS Tape length [m]	565

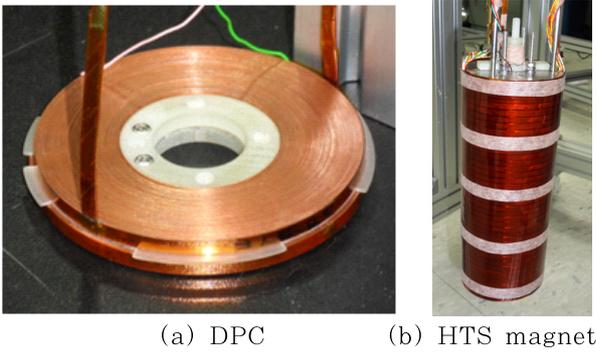


Fig. 8. (a) DPC and (b) Stacked HTS DPC coils installed with insert support. The Hall sensor is located in the inside of the bore.

4.2 HTS insert coil 여자 결과 및 분석

고온초전도마그넷을 4 K에서 여자하여 얻은 실험결과를 Fig. 9에 보인다. 얻어진 최대 중심자기장은 240 A에서 5.229 T이었다. 3장에서 모델 해석에 의하면 고온초전도마그넷의 최상단, 하단 위치에서 수직자기장이 가장 크게 발생한다. 그러나 수직자기장의 영향에 대한 실험결과와는 차이가 나며, 주요 원인으로 는 계산을 위한 I_c -B 자료의 미흡과 실험상 DPC 턴 수 차이인 것으로 보인다. 향후 실험에서 I_c -B 자료와 외측 LTS 마그넷 자기장 하에서의 실험자료 축적을 통해 보완되어야 할 부분이다. 실험결과에서 수직자기장의 영향이 가장 큰 최하단의 DPC에서 240 A의 임계전류가 관측되었다. 이것을 기반으로 16 개의 DPC로 제작된 고온초전도마그넷에 발생하는 자기장을 분석하여 보았다. 결과를 Fig. 10에 보인다. 제작된 고온초전도마그넷의 제원으로서 해석한 결과는 최대 중심자기장이 5.235 T로 나왔으며 실험결과와 매우 근사한 값을 얻을 수 있었다. Fig. 10(b)의 해석결과에서 수직자기장에 의하여 DPC에 미치는 영향을 볼 때에 최 외각의 DPC에서 1.81 T로서 가장 큰 값으로 나타났다. 여기에서 수직자기장에 의하여 DPC의 임계전류가 제한된다는 점을 고려할 때 수직자기장의 영향을 감소시키면 중심자기장을 증가시킬 수 있다는 것을 알 수 있다.

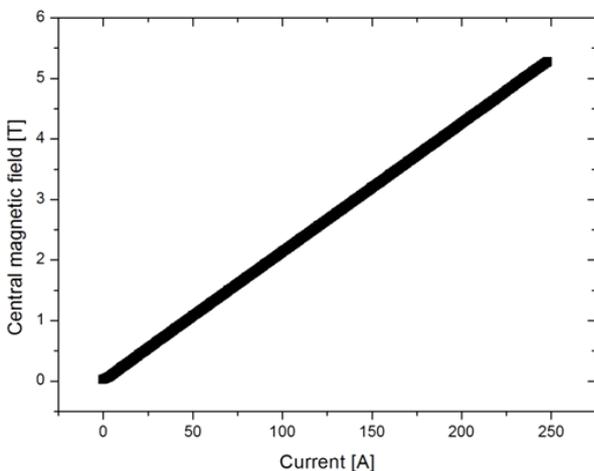


Fig. 9. Charged current and measured magnetic field at the center of HTS insert coil at 4.2 K.

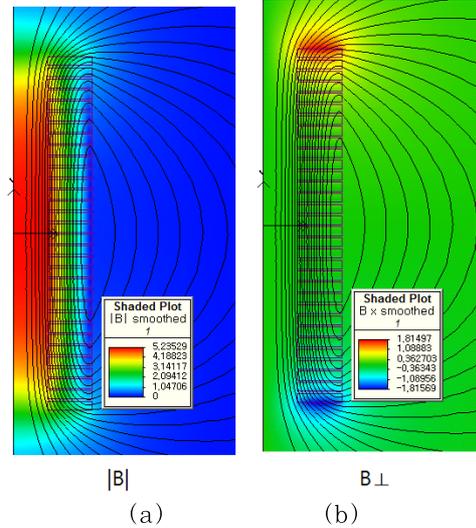


Fig. 10. FEM results of magnetic field distribution in 5 T HTS insert coil. (a) self-field magnetic field, (b) perpendicular magnetic field.

5. 결 론

본 논문에서는 15 T 외측마그넷 안에서 동작하는 5 T급 HTS 마그넷의 모델설계와 해석을 통하여 중심자기장이 최대가 되는 DPC 개수를 산출하였으며, 마그넷에 발생하는 수직자기장의 크기와 임계전류, 중심자기장을 구하였다. 계산 결과 DP의 개수가 감소함에 따라 임계전류는 증가하였고, 중심자기장이 최대가 되는 DP 개수가 존재하는 것을 확인하였다.

또한 모델 해석에서 얻어진 결과를 기반으로, 5 T급 고온초전도마그넷을 제작하여 액체헬륨 온도에서 성능평가를 한 결과 5.229 T를 얻을 수 있었다. 모델 해석을 참조한 실험결과와 분석에 의하면 최외각 DPC에 미치는 수직자기장의 영향을 감소시키면 중심자기장을 증가시킬 수 있음을 알 수 있다. 본 연구를 바탕으로 향후 수직자기장을 완화시킬 수 있는 고온초전도마그넷을 개발하여 15 T LTS 마그넷과 조합한 고자기장 초전도자석 연구를 수행하고자 한다.

참 고 문 헌

- [1] Bruker BioSpin, "The World's First 1 GHz NMR Spectrometer", website : www.bruker.com
- [2] Applied Superconductivity Center, website : <http://magnet.fsu.edu/~lee/plot/plot.htm>
- [3] SuperPower Inc, website : www.superpower-inc.com
- [4] D. Hazelton, V. Selvamanickam, "SuperPower's YBCO coated High-Temperature Superconducting (HTS) Wire and Magnet Applications," Proceedings of the IEEE, vol. 97, no. 11, pp. 1831-1836, 2009.
- [5] Cryogenic Limited, website : www.cryogenic.co.uk
- [6] (주)서남, website : www.i-sunam.com
- [7] Hiroyuki Fukushima et.al., "Properties of Long GdBCO Coated Conductor by IBAD-PLD Method-The First GdBCO Coil Test,"

IEEE Trans. Appl Supercond., vol. 17, no. 2, pp. 3367-3370, 2007.

저 자 소 개



구명환(具明煥)

1983년 1월 14일생, 2008년 순천향대 공대 정보기술공학부 졸업, 2010년 동대학원 전기통신공학과 졸업(공학석사), 현재 동대학원 전기공학과 박사과정.



김동락(金東洛)

1953년 4월 4일생, 1976년 경북대 문리대 물리학과 졸업, 1993년 Osaka City Univ. 이학박사(저온물리학). 현재 한국기초과학지원연구원 물성과학연구부 책임연구원.



최연석(崔然惜)

1969년 4월 5일생, 1996년 홍익대학교 기계공학과 졸업(공학석사), 2004년 미국 플로리다 주립대 공학박사(저온공학전공), 2005 NHMFL Post-Doc. 현재 한국기초과학지원연구원 선임연구원.



차귀수(車貴守)

1956년 7월 8일생, 1978년 서울대 공대 공업교육과 졸업, 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사), 현재 순천향대 전기공학과 교수.