

Development of a 1.8T HTS Insert Coil for High Field Magnet

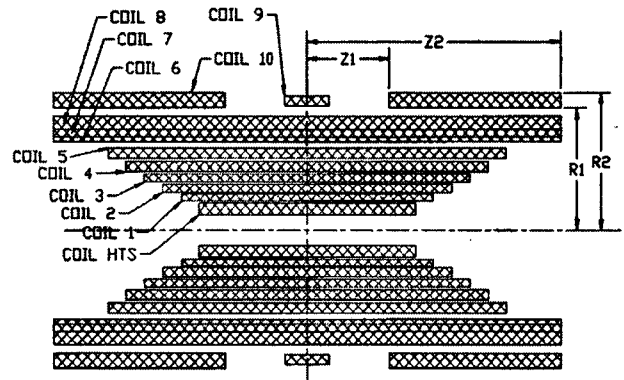
裴俊漢[†] · 成耆哲^{*}
(Joon-Han Bae · Ki-Chul Seong)

Abstract - We designed and manufactured a 1.8T high temperature superconducting(HTS) insert coil for a NMR magnet operated at 4.2 K. Suitable HTS superconductor and HTS coil were carefully designed and developed. We have selected multi-filamentary Bi2223 conductor fabricated by American Superconductor Corporation(AMSC). The selected conductor consists of Bi2223 filaments of 55, silver stabilizer and stainless steel reinforcement tapes. Therefore, it shows good hoop strength as well as compression tolerance. The conductor has a tape cross-section of 0.31mm x 4.8mm. the Bi2223 conductor shows large anisotropy of critical current. The critical current of conductor in magnetic field parallel to the flat surface are much higher than that in magnetic field perpendicular. The HTS coil has an inner diameter of 78 mm, an outer diameter of 127 mm and a coil length of 600 mm. In this paper, the detailed design, fabrication and test results on the HTS insert coil are presented.

Key Words : Bi2223 conductor, high temperature superconducting coil, 1.8T HTS insert coil

1. 서 론

고성능 NMR spectroscopy의 개발에 있어서 가장 중요한 요소는 고자장 발생이다. 자장의 증가는 signal to noise(SNR)로 정의되는 신호의 감도와 분해능을 현격히 향상시킨다[1]. 이러한 목적에서 한국전기연구원에서는 2003년부터 미국의 WangNMR사와 공동으로 800MHz(18.8T)급의 NMR 자석을 개발하고 있다[2]. 그림 1은 800MHz NMR 자석의 단면도이다. 구성은 먼저 영구전류모드로 운전되는 125mm의 상온공간을 갖는 725MHz LTS(low temperature superconducting) 자석을 제작하고, 상온공간 내부에 전원구동모드로 운전되는 HTS insert 코일을 결합하여 800MHz NMR 자석이 완성된다. NMR 자석의 중심자장의 세기를 높이기 위해서 NMR 자석의 중앙에 상전도 코일이나 고온초전도 코일을 삽입하여 사용할 수 있으나, 액체헬륨 속에서 운전되기 때문에 상전도 코일의 경우 액체헬륨의 증발량이 커서 거의 사용하지 않고, 고자장하에서 초전도 상태를 유지할 수 있는 고온초전도 코일을 대부분 이용하고 있다[3-5]. 본 논문에서는 전원구동모드로 운전되는 NMR 자석용 1.8T HTS 삽입코일을 개발하고자 고온초전도체 및 자석을 설계, 제작하여 그 성능을 평가하였고, 그 일련의 개발 과정과 결과를 기술하고자 한다.



COIL	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	HTS
R1	7.400	9.484	12.29	15.001	18.350	22.52	23.717	25.573	31.432	36.963	3.900
R2	9.083	11.840	14.451	17.600	20.97	23.717	25.573	28.92	33.924	34.819	6.804
Z1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	22.734	0.000
Z2	34.854	40.035	45.440	50.125	55.053	70.307	70.307	70.307	6.105	70.307	30.000

DIMENSIONS ARE IN CM

그림 1 800MHz NMR 자석의 단면도
Fig. 1 Cross section view of 800MHz NMR magnet

2. 1.8T HTS 코일용 고온초전도체 설계

1.8T HTS 코일 제작을 위하여 표 1과 같이 AMSC사로부터 2가지 종류의 고강도 Bi2223 tape 도체가 사용될 수 있다. 그림 2는 고강도 선재(high strength wire)와 고압축 선재(high compression tolerant wire)의 단면 비교이다[6]. 두 선재 모두 동일한 높은 임계전류밀도를 갖고, 선재의 상하표면에 스테인레스강 tape으로 보강되어 있다.

또한, 고압축 선재는 고강도 선재보다 보다 높은 기계적 특성을 보이는 데 이것은 고압축 선재의 상하 스테인레스강

[†] 교신저자, 正會員 : 한국전기연구원 초전도기기연구그룹
E-mail : baejh@keri.re.kr

^{*} 正會員 : 한국전기연구원 초전도기기연구그룹
接受日字 : 2007年 1月 22日
最終完了 : 2007年 3月 27日

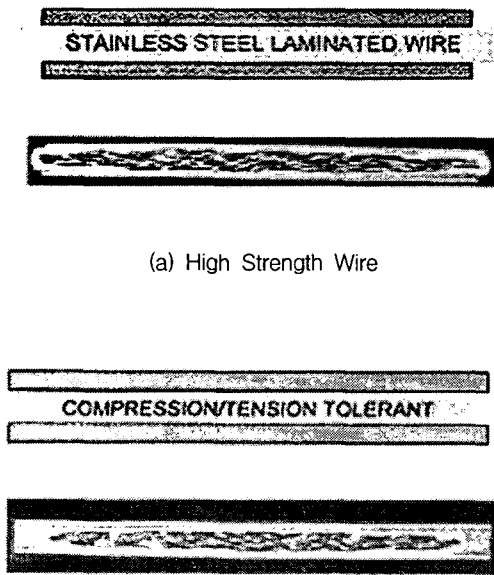
tape 사이의 좁은 공간을 납땜으로 채웠기 때문이다. 이러한 이유로 고압축 선재의 폭이 고강도 선재 보다 0.7mm 더 크다.

표 1 AMSC사의 고온초전도 선재의 사양 비교

Table 1 Bi2223 high strength wire and high compression tolerant wire

Item	High Strength Wire	High Compression Tolerant Wire
Average Thickness	0.31± 0.02 mm	0.31± 0.02 mm
Average Width	4.1± 0.2 mm	4.8± 0.2 mm
Min. Critical Bend Dia.*	70 mm	70 mm
Min. Critical Compressive Strain	-	-0.11 %
Min. Critical Tensile Stress**,**	265 MPa	265 MPa
Min. Critical Tensile Strain	0.4 %	0.3 %
Min. Ic**/Piece Length	115 A/300 m 125 A/200 m 135 A/100 m	

* with 95 % Ic retention, ** at 77 K, self-field, 1μV/cm



(a) High Strength Wire

(b) High Compression Tolerant Wire

그림 2 고강도 선재와 고압축 선재의 단면 비교

Fig. 2 Cross section for 2 high strength type Bi2223 wires

그림 3은 NHMFL(National High Field Magnet Florida Laboratory)에서 측정된 77K, 자기자장 하에서 135A의 임계전류밀도를 갖는 HTS 선재에 대해서 4.2K에서의 임계전류(Ic) 값들이다. Bi2223 tape의 Ic는 인가자장의 방향에 따라 큰 차이를 보인다. 도체 표면에 평행한 자장 하에서의 Ic(Bpar)가 수직인 자장 하에서의 Ic(Bperp) 보다 훨씬 높다. 고온초전도 코일의 여자시, 코일의 중심에서의 발생자장은 도체에 거의 평행하고, 수직성분은 코일 중심에서 축방향으로 멀어질 수록 증가한다. 고압축 선재는 18.8T의 수직자장 하에서 240A의 임계전류와 16129A/cm²의 임계전류밀도를 갖는다. 그림 4는 고강도 선재의 77K에서 Ic와 응력과의 관계이다[6]. 표 1을 보면 고압축 선재와 고강도 선재가 유사한 사양을 갖고 있음을 알 수 있다.

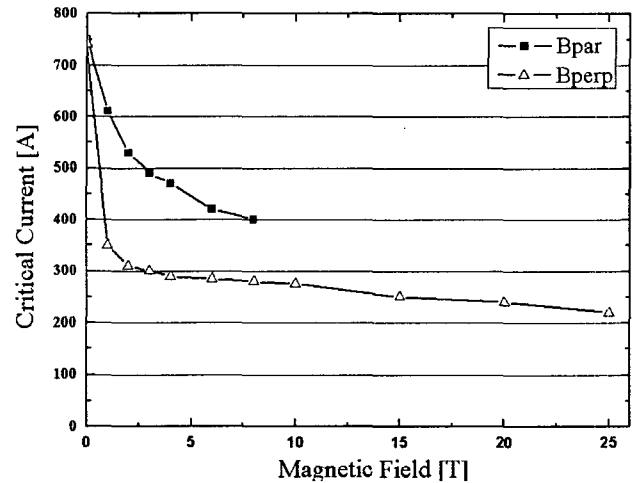


그림 3 4.2K에서 Bi2223 고강도 선재의 임계전류밀도와 자장과의 관계

Fig. 3 Magnetic field dependence of critical current for Bi2223 high strength wire at 4.2K

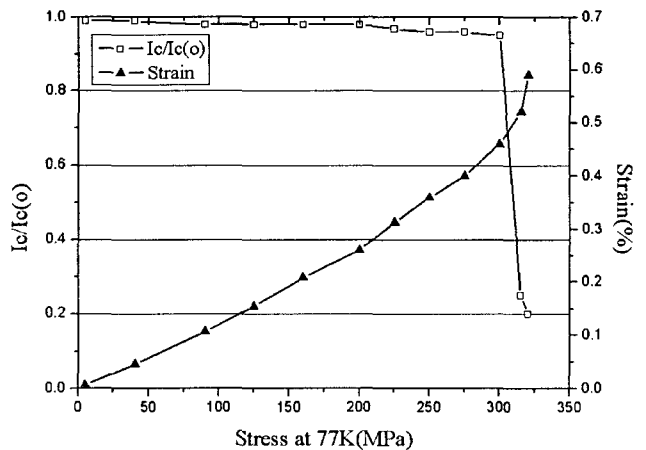


그림 4 Bi2223 고강도 선재의 임계전류밀도와 응력의 관계

Fig. 4 Strain sensitivity of critical current for Bi2223 high strength wire

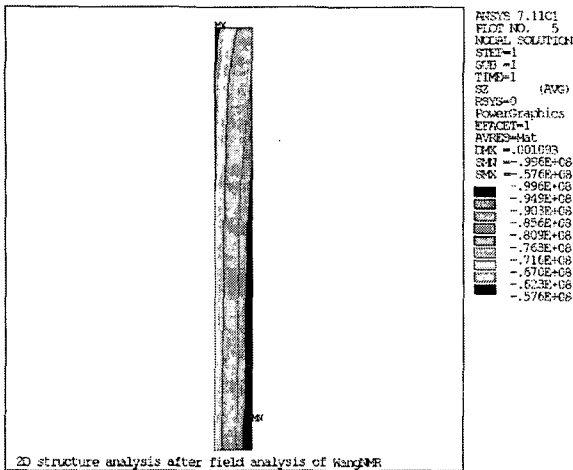


그림 5 HTS 코일내의 hoop stress
 Fig. 5 Calculated hoop stress distribution in the HTS coil

이러한 결과를 근거로 1.8T HTS 코일용 도체로서 0.31mm × 4.8mm 크기이고, 77K, 자기자장 하에서 135A의 임계전류밀도를 갖는 스트인레스 강화 Bi2223 HTS 도체를 선정하였다. 그림 5는 ANSYS를 이용하여 HTS 코일의 여자시 발생하는 전자력에 의해 HTS 코일내의 원주방향으로 발생하는 hoop stress 결과이다. 그림을 통해 LTS 코일들과 HTS 코일 간의 force interaction에 의해서 HTS 코일 내에서는 수축력이 발생하였음을 알 수 있다. 고온초전도 선재의 길이방향으로 인장력 인가시 임계전류의 95%까지 AMSC사가 보장하는 임계 tensile stress가 265MPa임을 고려하면 전자력에 의한 HTS 코일의 임계전류 저하나 코일의 움직임에 의한 캔칭 발생은 없을 것으로 판단된다. HTS 코일의 운전 전류와 전류밀도는 그림 3을 이용하여 각각 112.5A와 7528A/cm²로 결정하였다.

3. 1.8T HTS 코일의 제작 및 평가

그림 6은 선정된 고온초전도 선재를 이용하여 제작된 1.8T HTS 코일의 모습이다. 코일은 112개의 pancake 코일로 이루어진 56쌍의 double pancake 코일로 구성되며, 각 double pancake 코일의 길이는 48m 이다. 보빈의 재질은 비자성 304 스테인레스 강이며, 두께 0.08636mm의 kapton tape 3층에 의해 HTS 코일과 전기적으로 절연된다.

또한, 보빈의 Flange는 3.175mm 두께의 G-10 spacer로 절연되고, 0.06836mm 두께의 kapton tape이 이용하여 HTS 코일의 층간을 절연하였다. 또한, HTS 코일 중심영역에서의 자장 균일도를 높이기 위해서 코일 양끝 쪽의 15개의 double pancake 코일은 0.2159mm 두께의 G-10 spacer로 절연하고, 나머지 26개의 double pancake 코일은 0.5588mm 두께의 G-10 spacer로 절연하였다.

각 double pancake 코일은 1.932kg의 장력으로 권선되었고, 각 double pancake의 마지막 turn을 바로 전의 turn에 0.127mm 두께의 스테인레스강 tape를 이용하여 납땜하여 권선장력을 유지되도록 하였다. 권선 완료후에는 코일 외주에 3층의 스테인레스강 tape(0.254mm(두께) × 4.7752mm(폭))을 권선하여 기계적으로 보강하였다. 그림 7은 HTS 코

일의 성능시험을 위해 cryostat flange에 조립된 모습이다. HTS 코일의 전류도입선은 0.254mm(두께) × 101.6mm(폭)의 무산소동 sheet 위에 3개의 HTS 도체를 병렬로 납땜하여 제작되었다. 조립된 HTS 코일을 시험용 cryostat에 삽입하고, 그림 8과 같은 시험 시스템을 구축하였다. 그림 9는 코일의 여자 및 보호를 위한 제어장치로서, 양단전압의 저항성분을 측정하고, 전류를 안정화 시키는 역할을 한다.

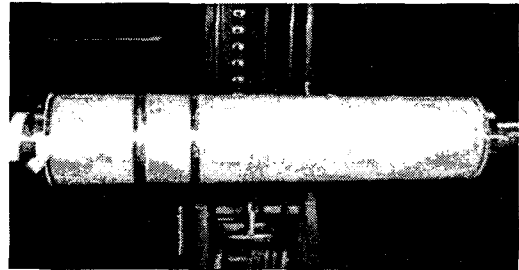


그림 6 완성된 HTS 코일
 Fig. 6 Completed HTS coil

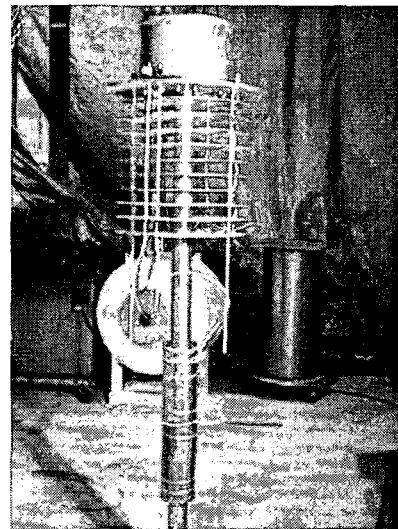


그림 7 Cryostat flange에 조립된 HTS 코일
 Fig. 7 Assembled HTS coil into the cryostat flange

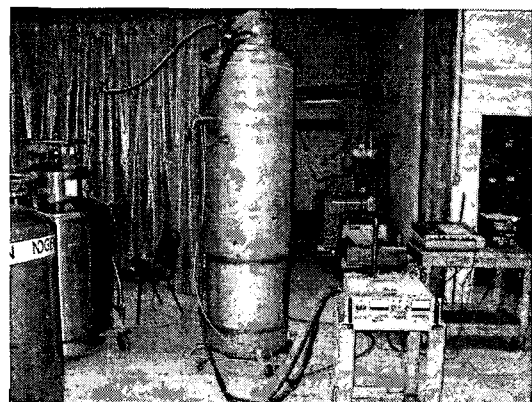


그림 8 HTS 코일 시험 장치
 Fig. 8 HTS coil test setup

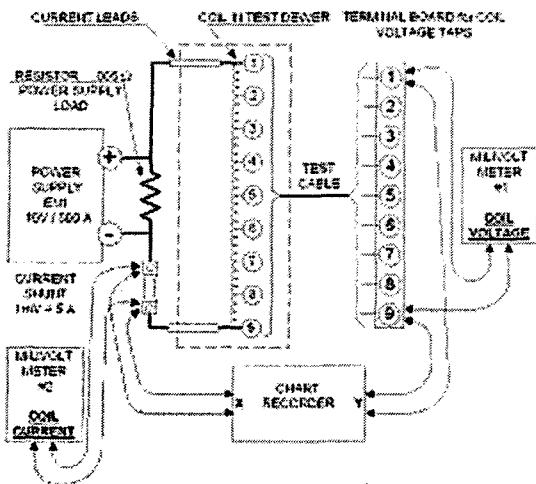


그림 9 HTS 코일 시험용 제어회로
Fig. 9 Control circuit for HTS coil test

표 2 1.8T HTS 코일의 사양
Table 2 Specifications of 1.8T HTS coil

pancake 수	112 개
크기	78mm(내경) x 127mm(외경) x 600mm(길이)
중심자장	1.8T
운전전류	112.5 A
인덕턴스	0.73 H
저장에너지	4.62kJ
초전도 접합수	55 개
평균 접촉저항	77 nΩ

표 2는 개발된 1.8T HTS 코일의 사양이다. 코일의 인덕턴스는 0.73H이고 저장에너지는 4.62kJ이다. 설계운전전류는 112.5A이지만, 시험에서는 114A까지 통전하였다. 여자시 유도성 전압성분이 사라져서, 전체 112개의 pancake 코일의 전류가 114A에서 안정화될 때 까지 0.4mV ~ 0.5mV의 저항성 전압강하가 발생하였다. 이 값을 이용하여 코일에서 발생된 최대 저항손실은 57mW로 계산되었다. 또한, 각 double pancake 코일 사이 및 양끝의 double pancake 코일과 HTS 전류리드 사이에 총 57개의 lab joint가 형성되었고, 각 joint의 평균저항은 77nΩ(=0.5mV/114A/57)으로 계산되었다. 이러한 결과로부터, HTS 코일은 114A에서 전원구동모드로 안정적으로 운전될 수 있음을 확인할 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서는 NMR 자석용 1.8T HTS 코일을 개발하였다. 이 코일은 112개의 pancake 코일로 구성되어 있으며, 4.2K에서 800MHz NMR 자석 운전시 1.8T의 자장발생에 기여할 것이다. 실험을 통해 4.2K에서 114A의 전류를 쉐어 없이 안정적으로 통전하였으며, 여자시 발생된 저항손실도 57mW 정도의 무시 가능한 수준임 확인하였다. 본 연구를

통해 얻어진 결과가 HTS 코일의 응용기기 개발에 크게 도움이 될 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 전력산업연구개발 사업의 지원에 의한 것입니다.

참 고 문 헌

- [1] Drew W. Hazelton, et al, "HTS insert coils for high field NMR spectroscopy, *IEEE Trans. Applied Superconductivity*, vol. 9, no. 2, pp. 956, 1999.
- [2] "초전도기술 산업화 지원센터 구축사업에 관한 보고서", 산업자원부, 2005
- [3] S. Pourrahimi, et al, "Conductors for a 1GHz superconducting magnet", *IEEE Trans. Magnetics*, vol. 30, no. 4, pp. 2756, 1994
- [4] Lee, Haigun, et al, "A high-temperature superconducting double-pancake insert for an NMR magnet", *IEEE Trans. Magnetics*, : a publication of the IEEE Superconductivity Committee, vol. 13, no. 2, pt.2 pp. 1546, 2003
- [5] Shoaff. P. V, et al, " HTS coil and joint development for a 5T NMR insert coil", *Advances in cryogenic engineering*, vol.41, no. A, pp.413, 1996
- [6] <http://www.amsuper.com/products/htsWire>

저 자 소 개



배 준 한 (裴 俊 漢)

1966년 4월 30일생, 1992년 건국대학교 전기공학과 졸업, 1994년 연세대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사), 현재 한국전기연구원 초전도기기연구그룹 선임연구원



성 기 철 (成 耆 哲)

1956년 2월 20일생, 1980년 한양대학교 전기공학과 졸업, 1983년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 2002년 창원대학교 전기공학과 졸업(공학박사), 1986년~현재 한국전기연구원 초전도기기연구그룹 책임연구원