

16 Tesla급 고자장 발생용 초전도 마그네트 개발^{**}

권영길*, 조전숙, 이인용, 전홍범,
하동우, 오봉환, 김해종, 오상수, 류강식
한국전기연구소 초전도용융연구사업팀

Development of 16 Tesla Superconducting Magnet.

Young-Kil Kwon, Jeon-Wook Cho, Eon-Yong Lee, Hong-Bum Jin,
Dong-Woo Ha, Bong-hwan Oh, Hae-Jong Kim, Sang-Soo Oh, Kang-Sik Ryu
Applied superconductivity Lab.
Korea Electrotechnology Research Institute

Abstract

The design and manufacturing results of a 16 tesla/45mm bore superconducting magnet is presented. The system consists of an 8.2 tesla(at 4.2K) outer NbTi coil with a bore I.D. of 261mm, a winding O.D. of 453mm and the length of 430mm which is connected in series with a 5.6 tesla(at 4.2K) middle and a 4.7 tesla(at 4.2K) inner insert coil constructed of multifilamentary Nb₃Sn. The middle and inner insert coil are reacted after winding. Also, epoxy impregnation is accomplished at Nb₃Sn coils using a low viscosity crack resistant epoxy which is forced into the coil with a series of vacuum and over atmosphere pressure cycle.

1. 서 론

초전도 기술을 MHD발전, SMES, 핵융합등의 전력용·용 및 입자기속기, 자기부상열차, 전자추진선, MRI, NMR등의 산업용·용을 위한 기반기술로서 고자장을 발생시킬 수 있는 초전도 마그네트를 설계·제작할 수 있는 기술을 개발하는 것이 선결과제이다.

초전도 마그네트로 발생시킬 수 있는 최대 차장은 20T 정도이며, 이와 같이 고자장 발생용 초전도 마그네트를 개발하기 위해서는 NbTi와 Nb₃Sn으로 구성되는 Hybrid형 마그네트의 설계기술과 초전도선재의 임계특성, thermal stress, Lorentz force, 펜치에 대한 보호 및 안정성을 확보할 수 있는 다 분할 초전도 마그네트의 최적 설계기술의 개발이 필수적인 요소이다.

아울러 고자장 마그네트의 제작에 필요한 요소 기술로는 극저온에서의 thermal stress, Lorentz force를 견디면서 초전도선이 보다 높은 임계특성을 발휘할 수 있는 정밀 권선 기술, 충간 isolation기술, Nb₃Sn 코일의 열처리기술, Nb₃Sn 코일의 전공가공 Epoxy 합침기술등의 핵심제작기술의 반드시 필요하다.

본 연구에서는 위에서 언급한 고자장용 초전도 마그네트의 설계·제작에 필요한 각종 요소기술들의 기반 위에 16 Tesla이상의 고자장을 발생시킬 수 있는 초전도 마그네트를 개발하고 있는데, 현재 설계완료되어 제작중에 있다. 금번 학술대회에서는 16 Tesla급 초전도 마그네트의 설계 및 제작기법에 대해서 발표하고자 한다.

**: 본 연구는 과학기술처의 연구비지원으로 수행된 것임

2. 16T급 초전도 마그네트의 설계

그림 1에 16 Tesla급 고자장 발생용 초전도 마그네트 시스템의 전체 개략도를 나타내었으며, 각각의 코일은 마그네트하부의 알루미늄 플랜지로 고정하며, 마그네트의 운전시 전자기력에 의해 각각의 코일이 움직이지 않도록 가공공차에 세심한 주의를 기울여야 한다. 또한 최외층 코일에는 보빈플랜지를 밖깥쪽으로 평창시키는 전자기력이 작용함으로서 하플랜지를 지지하는 스테인레스 플레이트로 고정한다.

그림 2에 설계된 초전도 코일의 단면 및 세부치수의 개략도를 나타내었으며, 그림 3에는 설계된 마그네트의 축방향 차장분포를 그래프로 나타내었다. 또한 표 1에 마그네트의 상세 재원 및 초전도선재의 사양을 나타내었다.

3. 초전도마그네트의 제작

가. 보빈제작

앞장에서 설계한 초전도마그네트의 데이터를 기초로하여 초전도 마그네트용 보빈을 제작하였으며 보빈의 제질은 권선후 Sb₃Sn 코일의 열처리 온도에서 충분히 견딜 수 있는 스테인레스 스틸을 사용하였으며, 보빈제작시 주의할 사항은 마그네트운전중 발생하는 전자력에 의한 스트레스와 극지온에서 충분히 견딜 수 있는 제질과 구조를 갖추어야 하며 전류 도입선 단자와의 연결부에서 초전도선재가 심하게 갈아지지 않도록 주의하여야 한다. 특히 Nb₃Sn 코일의 전류도입선부 및 NbTi 코일과의 연결부는 열처리후 soldering해야 되기 때문에 권선후 초전도선이 움직이지 않도록하는 특수한 고정방법이 필요로하게 된다.

나. 코일의 제작

(1) 권선

초전도코일의 권선은 매우 중요한 기술중의 하나로 권선 시 선재에 인가되는 Tension의 균일한 제어 및 역방향 화전이 가능하고, 정렬권선을 하여야 하기 때문에 일반적으로 사용하는 권선기로는 곤란하며 초전도 코일권선을 위한 특수한 권선기가 필요하게 된다.

최외층 코일은 단면적이 크고 많은 양의 초전도선이 필요하기 때문에 권선중 초전도선을 연결하는 것이 불가피하게 되는데, 권선형상을 변화시키지 않고, 절연 및 초전도선 간의 접합이 양호한 Jointing방법이 필요하며, 본 연구에서는 앞에서 언급하는 요구조건을 충분히 만족하는 권선내부에서의 초전도선의 Jointing방법을 개발하였다.

Nb₃Sn코일은 권선시 초전도 선재에 가해지는 응력에 기인한 초전도특성의 저하를 피하기 위하여 꼭을 반경이 작은

중·소형 마그네트의 경우, 권선후 열처리하는 과정으로 제작하는 것이 일반적이기 때문에 700°C 의 고온에서 견딜 수 있는 초전도선의 절연재 및 충간 절연지를 사용해야한다. 이와 같은 고온의 열처리온도에 견딜 수 있는 절연지로서는 Quartz Fiber가 일반적으로 사용되고 있으며, 권선시에는 fiber의 손상으로 인한 철연이 파괴되지 않도록 세심한 주의가 필요하다. 특히 권선의 시작과 끝부분에서 스텐레스 보인파의 접촉되는 부분에서 더욱 세심한 주의가 필요하게 된다.

(2) Nb_3Sn 코일의 열처리 및 전공합침

Nb_3Sn 코일은 앞에서도 언급한 것처럼 권선후 열처리하는 과정으로 제작되었으며, 열처리중 초전도선의 산화를 방지하기 위하여 아르곤 분위기중에서 700°C 로 72시간 열처리하였다. 특히 열처리중 Quartz Fiber중에서 발생되는 out gassing을 제거하기 위해 300°C 에서 5시간 동안 아르곤 가스를 흘리면서 가열하였다.

열처리후의 Nb_3Sn 코일은 생성된 초전도체가 매우 취성이 강하기 때문에 세심한 주의를 기울여 다루어야 하며, 마그네트 운전시에 가해지는 응력에 견디고 마그네트의 안정도를 향상시키기 위해 Epoxy진공가입 합침을 하였다. 진공가입 합침은 resin과 hardener가 잘 혼합되도록 교반하여야 하며 교반 및 마그네트가 담긴 용기에 충전시에 발생되는 기포와 코일의 권선내부에 잔재하는 공기를 제거하기 위해 장시간 진공시키게 된다. 충분한 진공제기후 진공의 파기 및 가압하는 과정을 5-6회정도 반복하여 합침을 종료한 후, 가열oven에서 curring시킨다.

합침시 권선내부에 기포가 존재하게 되면 극저온 상태에서 마그네트의 운전시 crack 발생의 원인이 되며, crack의 발생으로 인한 권선내부에서의 마찰 운동에너지의 발생으로 마그네트의 quench로 연결되게 된다. 따라서 마그네트의 합침시 기포가 존재하지 않도록 충분한 진공가입 및 예비실험이 필요하게 된다.

그림 4, 5, 6에 제작완료된 최외층 코일, 중층 및 최내층 코일과 각각의 코일에 사용된 초전도선의 단면 사진을 나타내었다. 현재 각각의 코일의 제작은 완료되었으나, 마그네트 시스템의 조립이전에 각각의 코일에 대한 성능시험이 사전에 이루어져야하며, 시험준비중에 있다. 각각의 코일의 권선 및 전공합침, 열처리등에 많은 제작시간이 소요되어, 고가의 초전도선을 사용하기 때문에 모든 제작공정에서 치밀한 사전준비 및 예비시험이 필요하다.

4 장 결 론

초전도 응용기기의 대부분은 고장 발생기술을 이용하는 것으로 초전도 마그네트 기술은 에너지, 의료, 산업, 수송, 과학 등의 전분야에 걸쳐서 확실히 실용화가 진척되고 있다. 본 연구에서는 초전도 응용기술의 기본이 되는 고장 발생 기술의 학습을 목표로하여 16Tesla급 이상의 초전도 마그네트의 설계 및 제작 기술을 개발하고 있다.

본 연구의 1차 및 2차년도에는 NbTi 초전도선을 사용하여 중심자장이 8 Tesla, bore diameter가 100mm인 초전도 마그네트의 개발에 성공하였으며, 3차년도에는 8Tesla이상의 고장장을 발생시키기 위하여 반드시 필요한 Nb_3Sn 코일의 설계 및 제작기술의 개발하였으며, 4차년도인 당해년도에는 16 Tesla이상의 고장장을 발생시킬 수 있는 초전도 마그네트 시스템의 설계 및 제작을 완료하고 성능평가시험중에 있으며, 성능평가결과를 차기 학술대회에서 발표할 예정이다. 또한 마그네트의 특성을 종합적으로 해석할 수 있는 simulation program을 개발하였다.

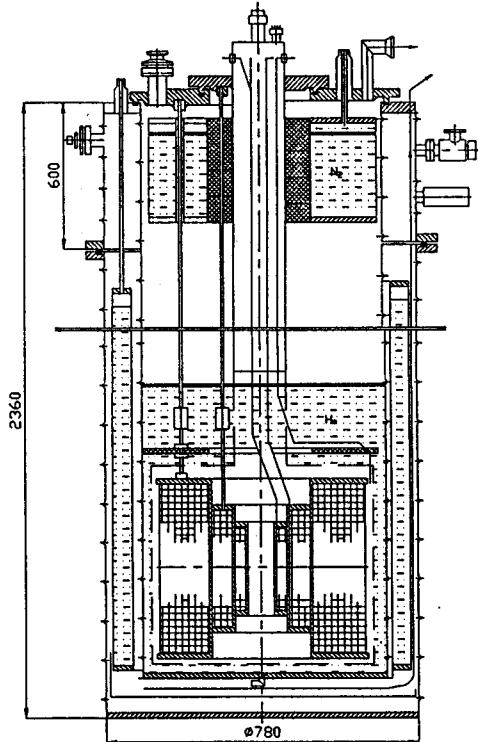


그림 1. 16T 초전도 마그네트 시스템 개략도.

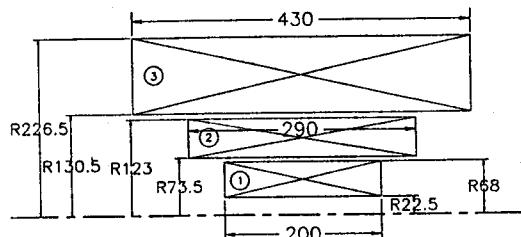


그림 2. 16T 초전도 코일의 개략도.

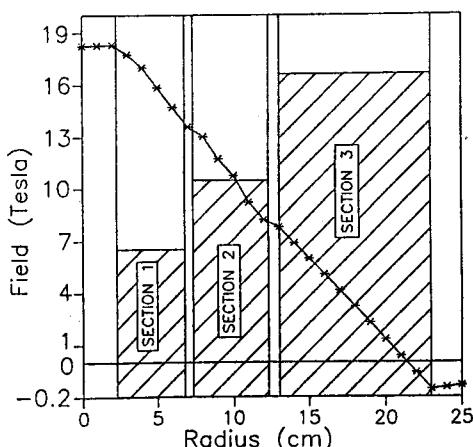
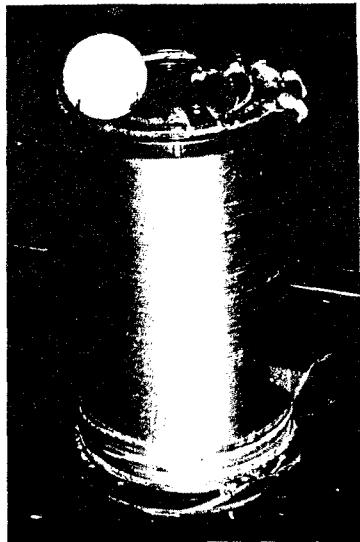


그림 3. 설계된 초전도 마그네트의 축방향 자장분포.

표 1. 16T 마그네트 및 초전도선의 설계사양

Item	Section①		Section②		Section③
Magnet	inner	outer	inner	outer	
Inner diameter : $2a_1(\text{mm})$	45.0	92	147	165	261
Outer diameter : $2a_2(\text{mm})$	92.0	136	165	246	453
Width : $2b(\text{mm})$	200	200	290	290	430
No. of turns/Layer	91	98	97	108	113
No. of layers	10	14	3	15	40
Packing factor(%)	65.2	64.1	68.6	67.7	76.6
Contribution to central field	4.7 Tesla		5.6 Tesla		8.2 Tesla
Operating current(A)	360		800		800
Total inductance(Henry)			6.59		
Total stored energy(MJ)			1.97		
Superconducting Wire					
Diameter(mm)	2.07	1.62	2.8	2.5	3.2 x 2
Insulation	Quartz fiber	Quartz fiber	Quartz fiber	Quartz fiber	
Superconductor Material	Nb ₃ Sn	Nb ₃ Sn	Nb ₃ Sn	Nb ₃ Sn	NbTi



↑ 초전도코일 ↓ 선재단면화대사진

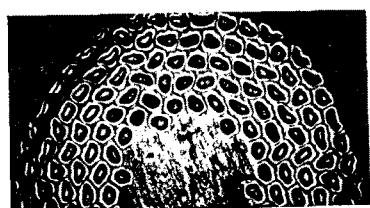
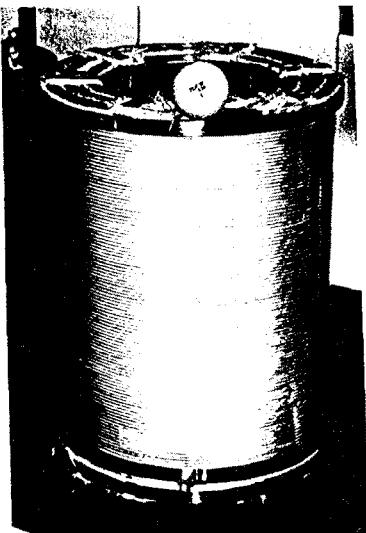


그림 4. 제작된 최내층 코일 및 선재단면.



↑ 초전도코일 ↓ 선재단면화대사진

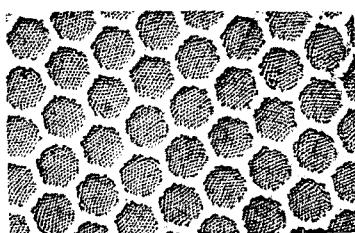
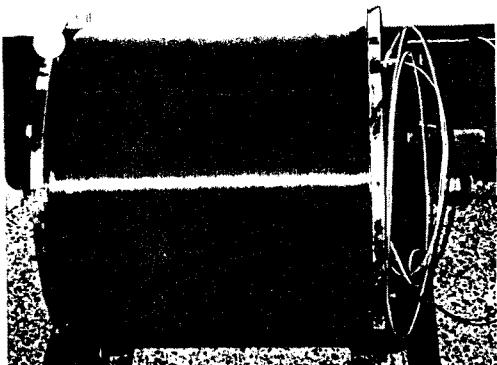


그림 5. 제작된 중층 코일 및 선재단면.



↑ 초전도코일 ↓ 선재단면화대사진

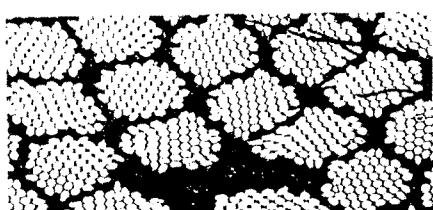


그림 6. 제작된 최외층 코일 및 선재단면.