

16 Tesla급 초전도 마그네트의 설계**

권영길, 조전욱, 이언용, 진홍범,
하동우, 오봉환, 류경우, 오상수, 류강식
한국전기연구소 초전도응용연구사업팀

Design of 16 Tesla Superconducting Magnet.

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

Abstract

The design 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 will be reacted after winding. Also, epoxy impregnation will be 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 마그네트의 개발은 50년대 2종 초전도체의 발견, 60년대 안정화 이론의 확립에 의해 비로소 가능하게 되었으며 꾸준한 기술개발에 의해 현재는 초전도 자석 자체만으로 최고 20T 정도의 고자장을 발생시킬 수 있게 되었다¹⁾.

초전도 마그네트의 특성은 사용하는 초전도선의 특성, 특히 임계자장(Hc)에 크게 의존한다. 현재 일반적으로 널리 사용되고 있는 초전도 선재는 NbTi 등의 합금계 초전도선과 Nb₃Sn, V₃Ga 등의 화합물계 초전도선이다. NbTi 초전도선은 4.2K에서 약 12T의 임계자장을 갖고 있으나 자장에 대한 임계전류의 특성으로 부터 마그네트를 제작할 경우의 발생자장은 9T 정도가 한계이고, 그 이상의 자장을 발생시키는 경우에는 Nb₃Sn, V₃Ga 등의 화합물계 초전도선을 사용해야 한다. Nb₃Sn, 및 V₃Ga는 4.2K에서 22T 정도의 높은 임계자장을 갖고 있지만 실제로는 Nb₃Sn는 16T 정도까지, V₃Ga는 18T 정도까지의 자장반응에 사용되고 있다. 화합물계 초전도선을 사용하여 마그네트를 제작하는 경우는 실재는 화합물계 초도선만으로 고자장 발생용 초전도마그네트를 제작하는 경우는 드물고 경제적인 측면에서 각섹션의 자장 레벨에 맞게 급속계 초전도 선재와 화합물계 초전도 선재를 사용하여 다섹션(multi-section)으로 설계, 제작하는 것이 일반적이다.

각종 초전도 마그네트의 설계 및 제작기술의 개발은 초전도기술의 산업적응용의 기반기술이라 할 수 있고^{2,3)}, 당 연구팀에서는 세계적 수준의 16Tesla급 초전도 마그네트의

연구개발을 추진하고 있는데, 이 연구의 일환으로 1차년도에는 NbTi 초전도선을 사용한 8 Tesla급의 초전도 마그네트의 설계 및 각종 제작기술을 개발하였으며, 2차 및 3차년도에는 NbTi 및 Nb₃Sn 초전도 선재를 사용하여 13 Tesla급의 초전도 마그네트의 설계 및 각종 제작기술을 개발하였다. 본 연구에서는 NbTi 및 Nb₃Sn 코일의 설계, 제작기술을 바탕으로 16Tesla급의 초전도 마그네트의 설계에 관하여 고찰한다.

2. 초전도 마그네트의 설계

2-1. 초전도 마그네트의 설계순서

마그네트의 설계 방침으로서서는 기본적으로 최외곽의 NbTi코일과 중앙의 Nb₃Sn코일, 내부의 Nb₃Sn의 세 색선으로 크게 분할하고, 전원공급장치는 외부와 중앙의 코일에 1000A급을 내부 코일은 500A급의 두대를 사용하며, NbTi 코일은 비합침 방식을 채용하고 Nb₃Sn코일은 합침방식을 채용한다. 본 마그네트의 설계과정을 정리하면 아래와 같다.

- (1) 코일의 권선내경 및 중심자장을 설정한다.
- (2) 마그네트의 운전온도를 결정하고, 초전도 도체를 선정한다.
- (3) 각각의 색선에서의 운전전류를 도체의 L_z근방의 값으로 설정하고, 도체의 절연의 두께나 권선시의 점직율을 고려하여 코일 내측에서의 평균전류밀도를 산정한다.
- (4) 외코일의 운전 전류를 중앙코일과 동일하게 하고, 외코일과 중앙코일 및 내코일의 평균 전류밀도를 산정한다.
- (5) 각각의 코일의 외경과 코일의 길이를 가정한다.
- (6) 자장계산을 행한다. 중심자장의 크기, 자장균일도, 각 코일에서의 최대 자장을 구한다.
- (7) 중심자장의 크기와 자장균일도가 요구성능을 만족하는가? 각 코일의 최대자장이 발생하는 지점에서 각각의 도체의 임계전류 이하치의 값을 가지는가를 조사한다.
- (8) (7)의 조건을 만족하는 코일의 길이, 직경을 조사한다.
- (9) 도체의 치수를 고려하여 turn수를 결정하고, 결정된 turn수만큼 권선할 수 있는 코일의 길이, 외경, 내경을 결정한다.
- (10) (9)에서 결정된 데이터로 자장계산을 행하여 기본 요구성능을 만족하는가를 확인한다.
- (11) 전자력 및 코일에 작용하는 용력을 계산하여 권선의 지지방법을 검토한다. 문제가 없다면은 (12)항으로 넘어가고, 전자력의 지지가 곤란한 경우는 권선부에 전자력 지지재를 도입하는 형태로 하여 (5) 단계로 되돌아간다.
- (12) 마그네트의 쿨치보호법을 검토한다. 만약 문제가 있

**:본 연구는 과학기술처의 연구비지원으로 수행된 것임

다면 운전전류를 크게하여 (2)항 부터 다시 재검토한다.

이와 같이 초전도 마그네트의 설계시에는 많은 인자들을 고려하여야 하며, 상호 보완적인 관계에 있는 인자보다는 상반되는 관계에 있는 인자들이 많기 때문에 서로 적절한 균형을 취하면서 설계하여야한다.

2-2. 16T이상급 초전도 마그네트의 설계지침

16T급 초전도마그네트는 아래와 같은 기본개념하에 설계되었다.

(1) 16T급 초전도 마그네트는 최외층, 중층, 최내층 코일의 세개의 코일로 구성되며, 최외층 코일은 NbTi초전도선을 사용하며, 250mm의 보-내에 8.2Tesla의 Back-field를 발생시키는 구조로 설계하고, 최외층에서의 강력한 전자력에 견딜 수 있도록 치밀한 구조의 권선형태를 얻을 수 있는 3.2mm x 2mm의 편각선의 NbTi초전도선을 사용한다.

(2) 개발되는 초고자장 발생용 초전도 마그네트의 사용용도를 초전도선재의 특성평가등에 활용하기 위하여 4.2K에서 18.5Tesla(3K이하에서 20Tesla)가 발생되는 clear bore diameter를 40mm이상으로 설계한다.

(3) 최내층 코일에 사용되는 초전도선재는 Tube Process로 제작되는 (NbTi)₃Sn초전도 선재를 사용하는데, 이 초전도선재는 일본의 Showa Electric Wire & Cable Co., Ltd.에서 개발시판하는 선재로서 고자장하에서 우수한 특성을 가지는 선재이다.

(4) 본 초고자장 발생용 초전도 마그네트 시스템은 최외층의 NbTi-coil이 250mm의 공간에 8.2Tesla의 자장을 발생시키고, 중간층의 Nb₃Sn-coil에서 70mm의 공간에서 5.6Tesla의 자장이 발생되며, 최내층의 (NbTi)₃Sn-coil에서 4.7Tesla의 자장을 발생시켜, 최종적으로 4.2K에서 18.5Tesla의 초고자장을 발생시킨다. 보다 높은 자장을 발생시키기 위하여 초유동헬륨을 냉매로 사용하며, 2.18K이하의 초유동헬륨을 사용하면, 4.2K에서 얻어진 자장에서 15%내외의 자장을 더 얻을 수 있는 것이 일반적이기 때문에 본 마그네트에 초유동헬륨을 냉매로 사용하면 20Tesla이상의 고자장을 얻을 수 있다.

(5) 마그네트 여자용 전원으로서 최외층 코일과 중층코일의 여자용으로 1000A정도의 DC 전원을 사용하고, 최내층 코일은 500A급의 DC전원 사용하여, 필요에 따라 마그네트의 운전용 최외층 코일과 중층 코일만을 운전하여, 140mm의 넓은 공간에서 13Tesla의 자장을 발생시킬 수 있다.

(6) (5)항에서 언급한 것과 같이 최내층 코일을 분리할 수 있는 구조로 설계하여, 향후 고자장하에 보다 좋은 초전도 특성을 나타내는 산화물계, Nb₃Al [30T], Nb₃Ge [41T]등의 초전도선재가 개발되면, 최내층 코일을 교체하여 보다 높은 초 고자장 마그네트 시스템으로 개발할 수 있는 구조로 설계한다.

2-3.설계된 마그네트의 성능분석

그림 1에 16Tesla급 고자장 발생용 초전도 마그네트 시스템의 전체 개략도를 나타내었는데, Cryostat와 초전도 코일부로 크게나눌 수 있으며, Cryostat의 높이는 약 2.4m,직경이 0.8m이고 축면 및 상부 액체질소조를 설치하여 축면으로 부터의 복사열침을 차단하고 전류도입선 및 상부 플랜지로부터의 복사 및 전도열침을 차단하기 위하여 상부 액체질소조를 설치하는 구조로하였다. 초전도 코일은 움직임을 방지하기 위하여 견고히 지지 및 고정하는 것이 무엇보다도 중요하다. 그림 1의 개략도에는 초유동 헬륨발생장치가 나타나 있지 않으나, 코일을 고정하는 하부 플랜지에 설치할 예정이다.

그림 2에는 설계된 초전도 코일의 단면 및 세부 치수를 나타내었는데, section 1 과 section 2는 Nb₃Sn초전도 선재로 만들어 지며, wind and react방식을 채용하여 코일의 권선후, 열처리 및 진공가압 액폭시 함침을 행할 예정이며, 현재 section 2 의 권선은 완료된 상태이며, 최외층 코일을 권선중에 있으며, 최내층 코일의 초전도선재는 일본의 Showa 전선에서 제작중에 있으며 선재가 인도되는 시점에서 제작될 예정이다.

표 1에는 설계된 초전도 코일의 주요 사양을 나타내었는데, 총 인덕턴스가 6.59헨리이며, 저장된 총에너지도 약 2MJ에 달한다. 따라서 quench시에 코일의 손상을 보호하기 위하여 균형된 에너지의 확산을 보장할 수 있는 보호저항의 설계가 중요하다. 그림 3에는 section 2 와 section3 의 제작에 사용될 Nb₃Sn 및 NbTi초전도선의 단면사진을 나타내었다.

그림 4에는 마그네트의 중앙단면에서의 자장분포를 나타내었다. 최내층의 코일에서는 약 18.5 Tesla의 자장이 발생되고, section 2에서는 13.8 section 3 에서는 8.2 Tesla의 자장분포를 나타낸다. 그리고 최내층 코일의 외곽부에는 자장의 방향이 바뀌게되어 권선이 느슨해질 우려가 있기 때문에 권선시 적절한 pre-tension 및 권선 종료후 적절한 힘을 가하여 bandage를 설치하는 것이 바람직하다.

최종 설계된 마그네트의 형상에 대하여 당 연구소내에 비치된 원형요소법에 의한 전자장 해석 프로그램인 FLUX-2D를 이용하여 자장분포를 해석하여 최종적으로 검정하였다. 그림 5에 설계된 마그네트의 자속분포 및 등포텐셜도를 나타내었다.

3. 결 론

본 연구에서는 초전도 응용기술의 기본이 되는 고자장 발생 기술의 확립을 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, 3차년도인 당해년도에는 8Tesla이상의 고자장을 발생시키기 위하여 반드시 필요한 Nb₃Sn코일의 설계 및 제작기술을 개발하였으며, 13 Tesla 급의 NbTi 및 Nb₃Sn hybrid형 초전도 마그네트를 제작하였다.

위에서 언급한 Nb₃Sn코일의 설계 및 제작기술, 13Tesla 급 Hybrid Type초전도 마그네트의 설계 및 제작기술을 바탕으로 16Tesla이상급의 고자장 발생용 초전도 마그네트의 기초설계를 완료하여, 각종 특성의 해석,상세설계 및 제작 준비중에 있다. 본 학술회에서 16Tesla이상급 초전도 마그네트의 설계에 관하여 발표하고, 향후 마그네트의 제작 및 성능평가결과를 발표할 예정이다.

참고문헌

1. T.Kiyoshi, et al, "Development of 20T Large Bore Superconducting Magnet(I),(II),(III)", 저온공학, Vol.28, No.5, 1993.
2. C.D.Henning, J.R.Miller, "Magnet Systems for the international thermonuclear experimental reactor", IEEE,Tran. Mag, Vol.25, No.2, 1989
3. T.Shintomi, et al, "Design of a large superconducting Spectrometer magnet", IEEE, Tran.Mag., Vol.25, No.2, 1989.
4. W.Koska, et al, "Tests of Fermilab built 40mm aperture full length SSC dipole magnets", IEEE

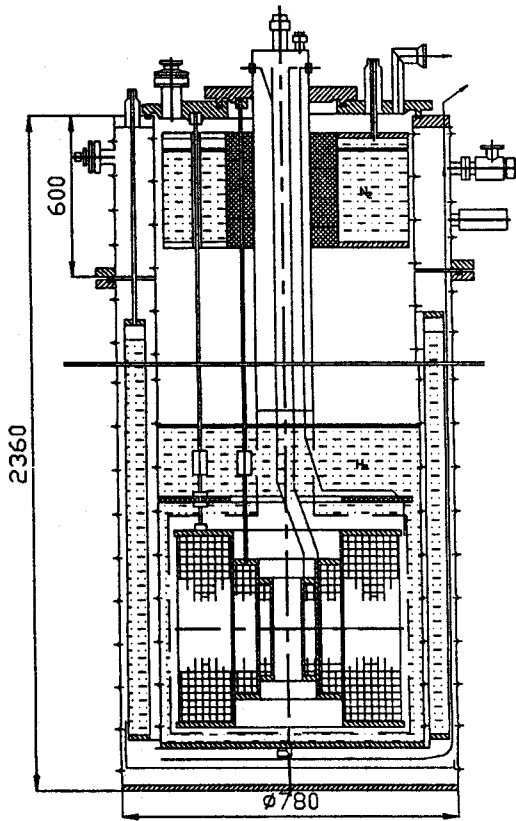


그림 1 초전도 마그네트시스템 개략도

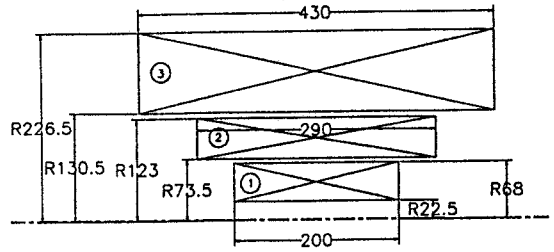


그림 2 초전도 코일의 단면.

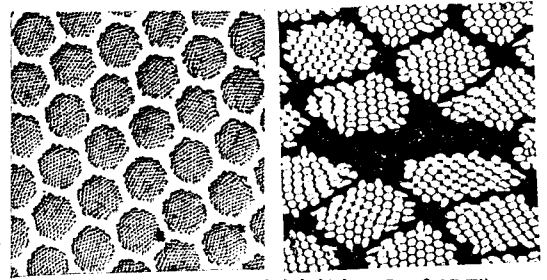


그림 3 초전도선 단면 확대사진(좌: Nb₃Sn, 우: NbTi)

표 1. 16T 마그네트 및 초전도선의 설계사양

Item	Section①		Section②		Section③
	inner	outer	inner	outer	
Magnet					
Inner diameter : 2a ₁ (mm)	45.0	92	147	165	261
Outer diameter : 2a ₂ (mm)	92.0	136	165	246	453
Width : 2b(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

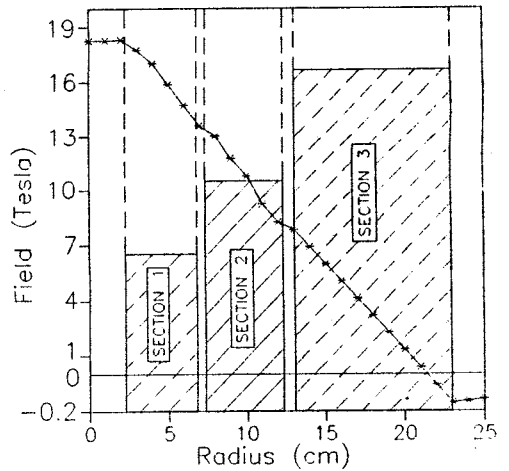


그림 4 코일 단면에서의 자장분포

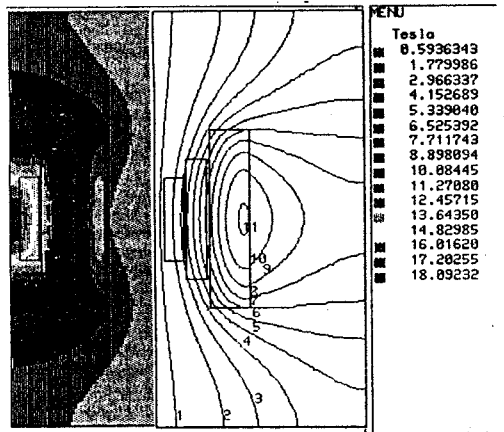


그림 5 자속 분포 및 등포텐셜 선도