

### 13 Tesla급 초전도 마그네트의 개발\*\*

조전욱, 이언용, 진홍범, 권영길°  
 하동우, 오봉환, 나완수, 오상수, 류강석  
 한국전기연구소 초전도응용연구사업팀

Development of 13 Tesla Superconducting Magnet.

Jeon-Wook Cho, Eon-Yong Lee, Hong-Bum Jin, Young-Kil kwon°  
 Dong-Woo Ha, Bong-hwan Oh, Wan-Soo Nah, Sang-Soo Oh, Kang-Sik Ryu  
 Korea Electrotechnology Research Institute

**Abstract**

The design and construction of a 13 Tesla / 46 mm bore superconducting magnet is presented. The system consists of an 5 Tesla outer NbTi coil with a bore I.D. of 144mm, a winding O.D. of 208mm and the length of 200mm which is connected in series with a 200mm long insert coil constructed of multifilamentary Nb<sub>3</sub>Sn. The insert coil was reacted after winding. Also, epoxy impregnation is accomplished at Nb<sub>3</sub>Sn coil using a low viscosity crack resistant epoxy which is forced into the coil with a series of vacuum and over atmosphere pressure cycle.

**1. 서론**

초전도 마그네트의 개발은 50년대 2중 초전도체의 발견, 60년대 안정화 이론의 확립에 의해 비로소 가능하게 되었으며 꾸준한 기술개발에 의해 현재는 초전도 자석 자체만으로 최고 20T 정도의 고자장을 발생시킬 수 있게 되었다<sup>1)</sup>. 대공간에서 고자장 발생, 성에너지, 고균동 자장 발생 등의 초전도 마그네트의 특징을 이용한 초전도 응용기기의 개발은 1960년대 부터 폭넓게 연구되어 왔으며, 물리실험용 고자장 초전도 자석 및 고균동 자장을 이용한 MRI(magnetic resonance imaging) 및 NMR(nuclear magnetic resonance)이 의료 및 화학 분야에 이미 상용화 되어 판매되고 있고, 교통 및 수송분야에서는 초전도자기부상열차, 초전도자기추진선박 등에, 전력기기분야에서는 초전도에너지저장장치, 초전도발전기, 초전도MHD발전등에 고에너지물리분야에서는 핵융합, 입자가속기등에 각종 초전도 마그네트가 광범위하게 활용되어 멀지않은 장래에 각종 초전도 응용 산업기체들이 개발되어 산업전반에 걸쳐 막대한 파급효과를 미칠 것으로 예상된다<sup>2,3,4)</sup>.

초전도 마그네트의 특성은 사용하는 초전도선의 특성, 특히 임계자장(Hc)에 크게 의존한다. 현재 일반적으로 널리 사용되고 있는 초전도 선재는 NbTi등의 합금계 초전도 선과 Nb<sub>3</sub>Sn, V<sub>3</sub>Ga등의 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 Nb<sub>3</sub>Sn, V<sub>3</sub>Ga등의 화합물계 초전도선을 사용해야 한다. Nb<sub>3</sub>Sn, 및 V<sub>3</sub>Ga는 4.2K에서 22T 정도의 높은 임계자장을 갖고 있지만 실제로는 Nb<sub>3</sub>Sn는 16T 정도까지, V<sub>3</sub>Ga는 18T 정도까지의 자장발생에 사용되고 있다. 화합물계 초전도선을 사용하여 마그네트를 제작하는 경우는 화합물계초전도선만으로

고자장발생용 초전도 마그네트를 제작하는 경우는 드물고 경제적인 측면에서 각색선의 자장레벨에 맞게 급속계 초전도 선재와 화합물계 초전도 선재를 사용하여 다색선(multi-section)으로 설계, 제작하는 것이 일반적이다.

위에서 언급한 것과 같이 각종 초전도 마그네트의 설계 및 제작기술의 개발은 초전도기술의 산업적응용의 기반기술이라할 수 있고, 본 연구에서는 저희 연구팀에서 세계적 수준급의 20Tesla급 초전도 마그네트의 연구개발을 추진하고 있는데, 이 연구의 일환으로 1차년도에 개발된 NbTi 초전도 선을 사용한 8 Tesla급의 초전도 마그네트의 설계 및 각종 제작기술을 바탕으로 NbTi 및 Nb<sub>3</sub>Sn 초전도 선재를 사용하여 13 Tesla 급의 초전도 마그네트의 설계 및 각종 제작기술에 관하여 고찰한다.

**2. 초전도 마그네트의 설계**

**2-1. 코일의 형상설계**

그림1과 같이 일정두께를 갖는 솔레노이드 코일의 중심자장은 코일의 형상계수를  $\alpha = a_2/a_1$ ,  $\beta = b/a_1$ 으로 정의하면, Biot and Savart식으로 부터 다음 식으로 계산된다.

$$B_0 = j a_1 F(\alpha, \beta) \dots\dots\dots (1)$$

$$\text{단, } F(\alpha, \beta) = \frac{4\pi}{10} \beta \ell n \frac{\alpha + \sqrt{\alpha^2 + \beta^2}}{\beta^2}$$

여기서 j는 점적용을 고려한 평균 전류밀도(Overall current density)이다.

또한 중심부근, 즉 내반경 r<sub>in</sub>을 반지름으로하고 중심이 코일 중심에 있는 구내의 임의의 점에서 Z방향과 R방향 자장은 구좌표를 사용하여 다음과 같이 Legendre polynomial의 멱급수(power series)로 표현할 수 있다<sup>5)</sup>.

$$B_z(\rho, \theta) = j a_1 [ F(\alpha, \beta) + F(\alpha, \beta) E_2(\frac{\rho}{a_1})^2$$

$$P_2(u) + F(\alpha, \beta) E_4(\frac{\rho}{a_1})^4 P_4(u) + \dots\dots ]$$

$$B_r(\rho, \theta) = j a_1 [ F(\alpha, \beta) + E_2(\frac{\rho}{a_1})^2 P_2'(u) F(\alpha, \beta) +$$

$$F(\alpha, \beta) E_4(\frac{\rho}{a_1})^4 P_4'(u) + \dots\dots ] \dots\dots (2)$$

여기서 ρ와 θ는 구좌표계의 성분으로 ρ는 반지름이고 θ는 Z축과 임의의 점이 이루는 각도이다. P<sub>n</sub>(u)와 P<sub>n</sub>'

\*\* : 본 연구는 과학기술처의 연구비지원으로 수행된 것임

(u)는 Legendre Polynomial과 그 미분치를 나타낸다.

Solenoid type coil의 형상설계는 마그네트 보아내에서의 실험공간 확보를 위해 직경을 46mm로 하고 중심자장을 13 Tesla, 동작전류를 마그네트 여자사에 선재에 인가되는 stress를 1000kg/cm<sup>2</sup> 이하가 되도록 형상을 설계하였으며, 설계 및 제작된 마그네트의 개략도를 그림2에 나타내었다.

마그네트의 설계시 동작전류는 자장이 가장 큰 부분에서 선재의 임계전류를 초과하지 않도록 설계해야 하며 본 연구에서 설계한 Solenoid type(13T, Ø46mm) 초전도 마그네트의 제작에 사용한 선재의 사양 및 마그네트의 표 1에 나타내었다.

표 1. 초전도선 및 마그네트의 설계사양

Item	Section①	Section②	Section③
<b>Magnet</b>			
Inner diameter : 2a <sub>1</sub> (mm)	50.4	70.2	143.7
Outer diameter : 2a <sub>2</sub> (mm)	70.2	123	208
Width : 2b(mm)	200	200	200
No. of turns/Layer	142	162	159
No. of layers	7	25	24
Packing factor( % )	56.4	59.94	67.1
<b>Superconducting Wire</b>			
Diameter(mm)	1.2	1.0	1.0
Insulation	Quartz fiber	Quartz fiber	Myler + Varnish
Superconductor Material	Nb <sub>3</sub> Sn	Nb <sub>3</sub> Sn	NbTi
Number of filaments	14,641	14,641	210

## 2-2. 자장분포의 해석

Multi-section 솔레노이드형 마그네트의 자장분포를 구하기 위하여 사용되는 수치해석 방법으로는 유한요소법, 유한요소 및 경계요소 병용법등의 마그네트의 자장분포를 구하는 수치해석 기법이 널리 사용되고 있다. 본 연구에서는 초전도 마그네트 bore내에서는 앞에서 언급한 Legendre Polynomial로 표현되는 (2)식을 사용하였으며, Winding 내부에서는 integral method를 사용하여 코일의 형상 설계시 자장분포를 계산하였고, 저회 연구소내에 비치된 유한요소법에 의한 전 자장해석 프로그램인 Flux-2D를 이용하여 설계한 초전도 마그네트의 자장분포를 해석하였다.

그림 3과 그림 4는 설계된 마그네트의 자속분포 및 등포텐셜선도를 나타내었다.

## 2-3. 설계된 마그네트의 성능분석

표2에 설계된 13 Tesla급 초전도 마그네트에 인가되는 동작전류를 250A, 270A, 300A로 변화시킴에 따라 마그네트의 각종 동작 특성을 분석하였다. 먼저 4.2K에서 운전하여 목적하는 중심자장 세기를 13 Tesla정도로 얻기 위해서는 270A정도의 동작 전류를 흘리는 것이 필요하고, 이 때에 Winding부에 가해지는 최대 Hoop stress는 Section②에서 822kg/cm<sup>2</sup>이 가해져 마그네트의 운전시 충분한 안정성을 확보할 수 있을 것으로 예상된다.

고자장 발생을 위해 사용되는 Nb<sub>3</sub>Sn초전도 선재는 초전도 물질이 금속간화합물로 이루어지고 선재에 가해지는 응력에 따라 초전도특성이 급격하게 떨어지기 때문에 고자장 발생용

초전도 마그네트의 설계, 제작시에 winding부에 가해지는 응력의 평가 무엇보다도 중요한 뿐만 아니라, 마그네트의 운전시 Quench 발생의 주요한 원인이 될 수 있어 고자장 발생을 위한 마그네트의 안정적 운전에는 매우 중요한 인자이다.

동작전류를 300A로 할 경우는 본 마그네트 제작에 사용된 초전도 선재의 임계전류에는 제약을 받지않을 것으로 예상되나, Section②에서 가해지는 최대 hoop stress가 1015 kg/cm<sup>2</sup>이다. 이론적으로 구해진 값은 아니지만 일반적으로 초전도 마그네트 제작시 경험적으로 적용되고 있는 1000kg/cm<sup>2</sup>의 값을 넘어서고 있고 마그네트의 안정성에 다소 문제가 있을 것으로 예상된다.

따라서 본 마그네트는 270A에서 280A로 운전할 경우는 목적하는 중심자장을 얻을 수 있고 안정적으로 운전할 수 있을 것으로 분석된다.

표 2. 동작전류에 따른 초전도 마그네트의 성능변화

(a) 동작전류가 250A 일 때

Item	Section①	Section②	Section③	Total
Magnetic Field(T)	1.48	5.69	4.67	11.67
<b>Current Density</b>				
-Average(kA/cm <sup>2</sup> )	12.5	19.1	14.9	
-Conductor(kA/cm <sup>2</sup> )	22.1	31.8	22.1	
Hoop Stress(kg/cm <sup>2</sup> )	373.58	669.38	475.25	
Coil Energy(kJ)				100

(b) 동작전류가 270A 일 때

Item	Section①	Section②	Section③	Total
Magnetic Field(T)	1.6	6.15	4.86	12.61
<b>Current Density</b>				
-Average(kA/cm <sup>2</sup> )	13.5	20.6	16.1	
-Conductor(kA/cm <sup>2</sup> )	23.9	34.4	23.9	
Hoop Stress(kg/cm <sup>2</sup> )	439.5	822.77	554.34	
Coil Energy(kJ)				117

(c) 동작전류가 300A 일 때

Item	Section①	Section②	Section③	Total
Magnetic Field(T)	1.78	6.83	5.40	14.01
<b>Current Density</b>				
-Average(kA/cm <sup>2</sup> )	15.0	22.9	17.9	
-Conductor(kA/cm <sup>2</sup> )	26.5	38.2	26.5	
Hoop Stress(kg/cm <sup>2</sup> )	542.3	1015	684	
Coil Energy(kJ)				144

또한 설계된 마그네트의 Total Inductance는 3.2 Henry이며, Homogeneity는 100mm DSV에서 7.7%로 IGC사의 12 Tesla 초전도 마그네트와 유사한 값을 가졌다.

## 3. 초전도마그네트의 제작

### 3-1. 보빈제작

앞장에서 설계한 초전도마그네트의 데이터를 기초로하여 초전도마그네트용 보빈을 제작하였으며 보빈의 재질은 권선

후  $\text{Sn}_3\text{Sn}$  코일의 열처리 온도에서 충분히 견딜 수 있는 스테인레스스틸을 사용하였다. 보빈제작시 주의할 사항은 마그네트운전시 발생하는 전자기력에 의한 스트레스와 극저온에서 충분히 견딜수 있는 재질과 구조를 갖추어야 하며 전류 도입 선단자와의 연결시 초전도선재가 심하게 꺾이지 않도록 주의하여야 한다. 특히  $\text{Nb}_3\text{Sn}$  코일의 전류도입선부 및  $\text{NbTi}$  코일과의 연결부는 열처리후 soldering해야되기 때문에 권선후 초전도선이 움직이지 않도록하는 특수한 고정방법이 필요로 하게 된다.

### 3-2. 코일의 제작

#### (1) 권선

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

$\text{NbTi}$  코일의 권선은 코일내에 선재의 접속이 없으며 층간에 FRP Pre-plag를 사용하여 중간절연 및 선재의 고정을 양호하게하여 Epoxy함침을 하지않고도 마그네트의 안정성을 향상시킬 수 있도록 권선하였다.

$\text{Nb}_3\text{Sn}$ 코일은 권선시 초전도 선재에 가해지는 응력에 기인한 초전도특성의 저하를 피하기 위하여 곡률반경이 작은 중, 소형 마그네트의 경우, 권선후 열처리하는 과정으로 제작하는 것이 일반적이기 때문에  $700^\circ\text{C}$ 의 고온에서 견딜 수 있는 초전도선의 절연체 및 중간 절연지를 사용해야한다. 이와 같은 고온의 열처리온도에 견딜 수 있는 절연지로서는 Quartz Fiber가 일반적으로 사용되고 있으며, 권선시에는 fiber의 손상으로 인한 절연이 파괴되지 않도록 세심한 주의가 필요하다. 특히 권선의 시작과 끝부분에서 스텐레스 보빈과의 접촉되는 부분에서 더욱더 세심한 주의가 필요하게 된다.

#### (2) $\text{Nb}_3\text{Sn}$ 코일의 열처리 및 진공함침

$\text{Nb}_3\text{Sn}$ 코일은 앞에서 언급한 것처럼 권선후 열처리하는 과정으로 제작되었으며, 열처리중 초전도선의 산화를 방지하기 위하여 아르곤 분위기중에서  $700^\circ\text{C}$ 로 72시간 열처리하였다. 특히 열처리중 Quartz Fiber중에서 발생하는 out gasing을 제거하기 위해  $300^\circ\text{C}$ 에서 5시간 동안 아르곤 가스를 흘리면서 가열하였다.

열처리후의  $\text{Nb}_3\text{Sn}$  코일은 생성된 초전도체가 매우 취성이 강하기 때문에 세심한 주의를 기울여 다루어야하며, 마그네트운전시에 가해지는 응력에 견디고 마그네트의 안정도를 향상시키기 위해 Epoxy진공가압 함침을 하였다. 진공가압 함침은 resin과 hardener가 잘 혼합되도록 교반하여야하며 교반 및 마그네트가 담긴 용기에 충전시에 발생하는 기포와 코일의 권선내부에 잔재하는 공기를 제거하기 위해 장시간 진공시키게 된다. 충분한 진공배기후 진공의 파기 및 가압하는 과정을 5-6회정도 반복하여 함침을 종료한 후, 가열oven에서 curing시킨다.

함침시 권선내부에 기포가 존재하게되면 극저온상태에서 마그네트의 운전시 crack 발생의 원인이되며, crack의 발생으로 인한 권선내부에서의 마찰 운동에너지의 발생으로 마그네트의 quench로 연결되게된다. 따라서 마그네트의 함침시 기포가 존재하지 않도록 충분한 진공가압 및 예비실험이 필요하게된다.

#### (3) 소형 $\text{Nb}_3\text{Sn}$ 코일의 제작 및 성능평가

$\text{Nb}_3\text{Sn}$  코일의 권선, 열처리 및 진공가압 함침과정을 확인

하기 위하여 소형의 시험용  $\text{Nb}_3\text{Sn}$ 코일을 제작하여 성능을 평가하였다. 위에서 언급한 권선, 열처리, 진공가압함침과정을 거친후 10 Tesla의 Back Field에서 500A이상을 통전시켰으나, 코일에서 quench가 발생되지않았다. 따라서 본 연구에 개발된  $\text{Nb}_3\text{Sn}$ 코일의 모던 제작기법들이 이상이 없다는 것을 확인 하고 13 Tesla급의  $\text{Nb}_3\text{Sn}$ 코일을 제작하였다.

### 3-3. 플랜지 제작

초전도코일을 운전하기 위하여 초전도자석용 플랜지를 제작하였다. 플랜지는 전류도입선, 보호저항, Thermal damper, 코일지지판 등으로 구성되며 그림 5는 마그네트 및 플랜지의 조립도면이다.

플랜지제작시 헬륨손실의 저감을 위하여 6층의 Thermal damper를 설치하였으며 전류도입선은 극성별로 각각 4개로 나누어 마그네트운전시 통전전류량을 분담시킴으로서 각 전류도입선별로 온도상승폭을 낮추어 헬륨소모량을 저감하였다.

## 4. 결 언

초전도 응용기기의 대부분은 고장장발생기술을 이용하는 것으로 초전도 마그네트 설계 및 제작기술은 에너지, 의료, 산업, 수송, 과학 등의 전분야에 걸쳐서 착실히 실용화가 진척되고 있다. 본 연구에서는 초전도 응용기술의 기본이 되는 고장장 발생 기술의 확립을 목표로하여 13 Tesla급의 초전도 마그네트의 설계 및 제작 기술을 개발하고 있다.

본 연구의 1차년도에서  $\text{NbTi}$  초전도선을 사용하여 중심자장이 8 Tesla, bore diameter가 100mm인 초전도 마그네트의 개발에 성공하였으며, 이 연구결과를 바탕으로 현재 13 Tesla의 초전도 마그네트는 설계 및 제작이 완료되어 성능평가중에 있다.

고장장 발생을 위한  $\text{Nb}_3\text{Sn}$ 코일의 설계 및 제작과정을 확인하기 위하여 소형으로 제작된 sample coil의 성능평가 결과 500A이상을 통전할 수 있어,  $\text{Nb}_3\text{Sn}$  코일의 제작에 필요한 제반 기술들이 이상이 없다는 것을 확인하였으며, 13 Tesla 급의 초전도 마그네트의 성능평가결과는 본 학술대회에서 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 Tran, Mag. Vol. 28, No.1, 1992.
5. D.B.Montgomery, "Solenoid Magnet Design", Robert E. Kriger Publishing Company, Huntington, New York, 1980

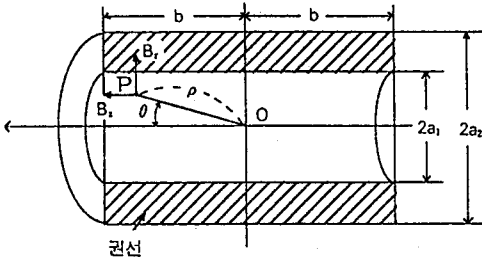


그림 1. Solenoid type coil의 형상.

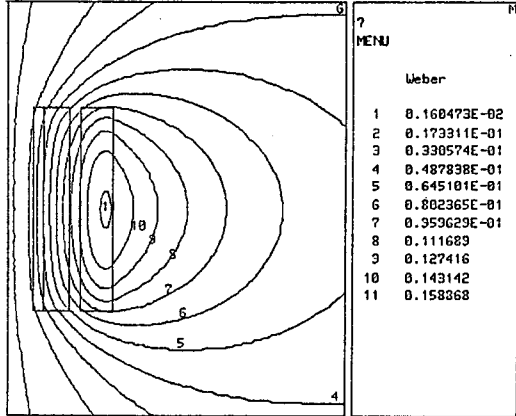


그림 4. 설계된 마그네트의 등포텐셜 선도(축대칭).

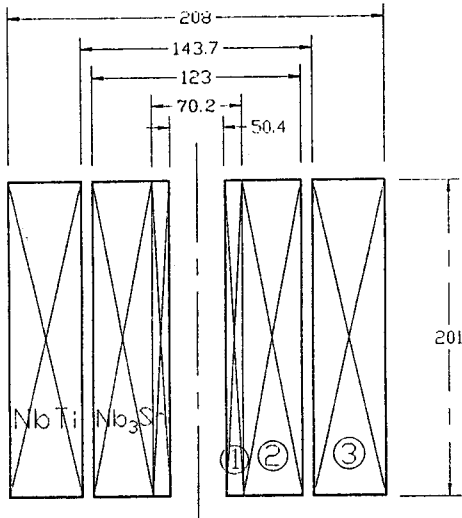


그림 2. 설계된 마그네트의 개략도.

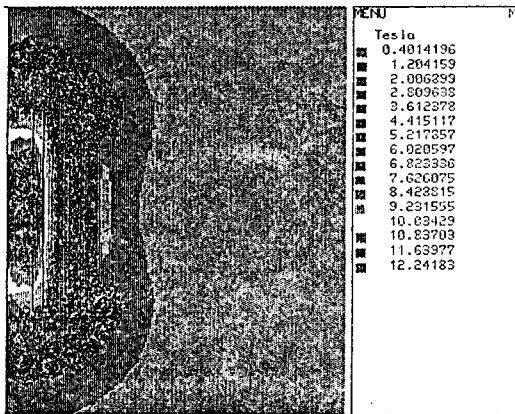


그림 3. 설계된 마그네트의 자속분포(축대칭).

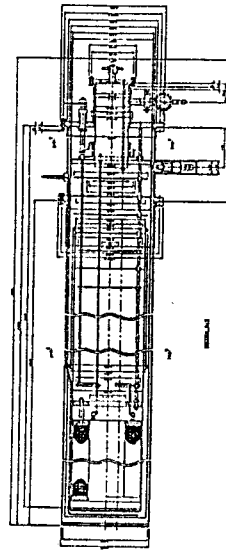


그림 5. 플렌지 및 마그네트 조립도면.