

# 대구경 초전도 솔레노이드 디자인

장현식, 박수현, 오상준, 심성엽, 김형찬, 김영순, 방소희, 이명호, 이형철  
대전시 유성구 어은동 52, 한국기초과학지원연구원 극한물성팀

## Design of a large bore superconducting solenoid

H.-S. Chang, S.H. Park, S.J. Oh, S.Y. Shim, H.C. Kim, Y.S. Kim, S.H. Bang, M.H. Lee,  
and H.-C. Ri,

Material Science Team, Korea Basic Science Institute, 52 Yeoeun-Dong Yusung-Ku Daejeon, 305-333,  
Korea

chsik@kbsi.re.kr

**Abstract** - We designed a large bore superconducting solenoid as a source of magnetic field inside liquid-nitrogen-jacketed liquid helium dewar. The diameter of the sample space in the dewar is about 10.0 cm. Considering the space for thermal insulation between liquid helium and the sample tube, the solenoid bobbin has been designed to be 12.0 cm and the most inner layer of the solenoid 13.0 cm. The desired uniformity of the field, which is  $\sim \pm 0.1\%$  of the central field amplitude deviation within  $\sim 5.0^2 \times 3.6 \text{ cm}^3$  with the shortest dimension along the solenoidal axis, restricted the length of the solenoid to be at least 41.14 cm.

### 1. 서 론

고온초전도 선재와 같이 그 크기가 수cm가 되는 시료들의 여러 가지 물리적 성질과 특성을 연구하는 데 있어서 대형 저온유지장치(cryostat)는 필수적이다. 이러한 저온유지장치에 장착되는 초전도 솔레노이드 자석 또한 그 크기가 일반적으로 상용 판매되는 자석보다 대형이고, 시간과 비용의 측면에서 보더라도 실제로 요구되는 자장 세기의 균일성을 가지는 솔레노이드를 직접 제작하는 것이 유리하다고 판단되었다.

### 2. 본 론

저온유지장치 시료 튜브의 최소 요구 직경이 10.0 cm이고 액체 헬륨과의 진공 격리를 고려하면 보빈(bobbin)의 최내각 직경은 12.0 cm가 적당하다. 또한 솔레노이드 센터를 중심으로 면적  $5.0^2 \text{ cm}^2$ , 축 방향의 길이 3.6 cm 정도의 공간에서 약  $\pm 0.1\%$ 의 자장 세기 균일성을 가지려면 Fig.1에 표시된 바와 같이 솔레노이드는 최소한 41.14 cm의 높이를 가져야 한다. 솔레노이드를 감는데 사용될 초전도 선재의 스펙은 Table 1과 같다.

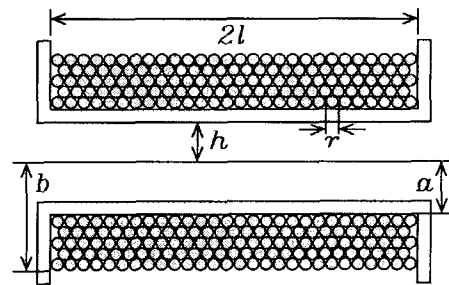


Fig. 1. Schematic illustration of the bobbin and solenoid.  $2h=12$ ,  $2a=13$ ,  $2b=15.7$ ,  $l=41.14$ ,  $r=0.0857$  (units in cm)

Table 1. Specification of the superconducting wire used for the solenoid.

Company	GEC ALSTHOM
Identification	Billet n° 4/66
Length	4608m
Finished / bare dimensions	$\varnothing 0.857\text{mm} \pm 0.001\text{mm} / \varnothing 0.794\text{mm}$
Cu/NbTi ratio	1.8
Twist pitch	28mm to right
Critical current / $H_{c20} / T_c$	refer to Fig. 3 / 13 T / 9.5 K
RRR ratio (300K/10K)	54

478회전 18층 구조를 가지는 솔레노이드에서 Fig. 1의 보빈을 사용할 경우 소비되는 선재의 총 길이가 약 4 km이고 뺨뺨이 들어찬 구조(close-packed)로 선재를 감는 것이 가장 쉬우므로 완성될 솔레노이드의 최외각 직경은 약 15.7 cm가 된다.

실제로 실험에 사용될 자기장의 세기가 약 5 T 일 경우 앞에서 언급한 솔레노이드에는 200 A의

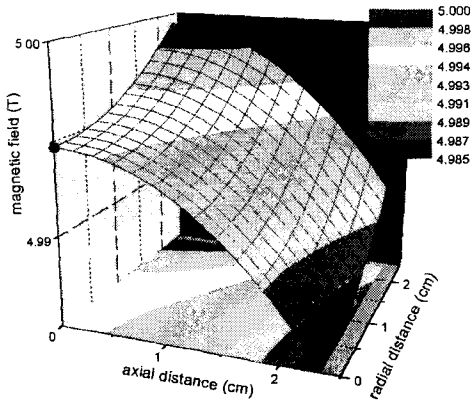


Fig. 2. Magnetic field distribution of the axial field component along the axial and radial direction of the solenoid. The dot on the field axis denotes the center of the solenoid.

전류를 인가해야 된다. 그 때 발생하는 자기장의 공간적 분포를 계산하면 [1, 2] Fig. 2와 같다. 솔레노이드의 축 방향으로의 자장의 세기가 급속히 감소하는 반면 내경 방향으로의 완만히 증가한다. 자장의 세기가 가장 큰 솔레노이드 내벽(5.0288 T)과 솔레노이드 센터 자장(49947 T)의 비는 1.007로서, 디자인된 솔레노이드의 부피는 큰 반면 자장 세기는 아주 균일한 것을 알 수 있다.

한편 솔레노이드에 사용될 초전도 선재의 스펙에 따른 임계면(critical surface)과 디자인된 솔레노이드의 작동 곡선(peak field function)이 만나는 지점은 Fig. 4에서 보는 바와 같이 약 7.3 T에서 290 A이다. 초전도 솔레노이드의 예정 작동

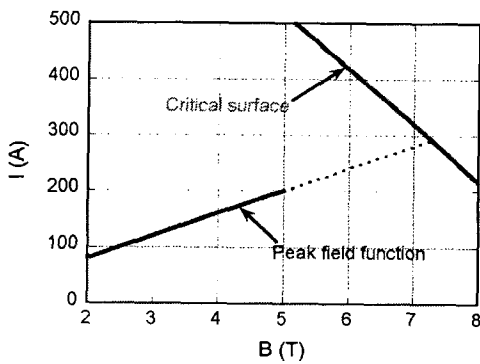


Fig. 70. Critical surface of the superconducting wire and peak field function of the designed solenoid. Crossing occurs at 7.3 T, 290 A.

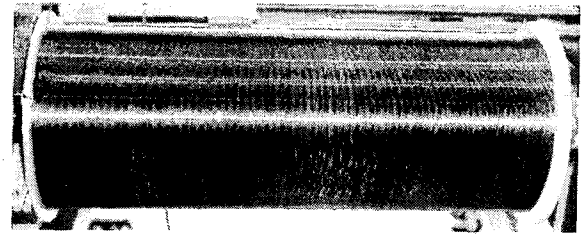


Fig. 4. Photograph of the finished solenoid which has 18 layers each consisting of 478 turns. The winding speed was about 3~5 rpm.

지점인 5 T에서 200 A와 비교해보면 대략 50%의 여유가 있음을 알 수 있다. 그러므로 실제 작동시 나타날 수 있는 퀀치(quench)에 의한 초전도 상태 깨짐에 대해서도 안전하고 선재의 자체 퇴화를 원상 회복시켜주기 위해 고의로 퀀치 상태로 만드는 트레이닝(training) 단계를 거치지 않고도 작동이 가능하다.

Figure 4는 Table 1에 언급된 선재를 이용해서 디자인한 대로 각 층이 478번의 회전 구조를 가지는 18층 솔레노이드 완성품의 사진이다. 감는 속도는 솔레노이드의 위치에 따라 3~5 rpm이었는데 가장자리에서는 느리게 그리고 중앙에서는 그보다 빠른 속도로 회전시켰다. 완성된 솔레노이드의 인덕턴스(inductance) 측정값은 10 Hz에서 약 3.16 H였다 (GenRad 1689MRLC Bridge).

### 3. 결 론

앞으로 제작할 대형 저온유지장치에 장착될 솔레노이드를 용도에 맞게 디자인하고 권선 장치를 이용해서 완성했다. 초전도 자석으로서의 기능을 다하기 위해서는 솔레노이드의 스트레스 분석과 함께 솔레노이드의 진공 예폭시 침몰과 영구 모드 작동용 초전도 스위치, 퀀치 탐지/보호 회로, 그리고 적절한 전류 인가 장치들의 장착이 필수적이다.

### [참 고 문 헌]

- [1] M. N. Wilson, "Superconducting Magnets", (Clarendon Press Oxford, 1983).
- [2] D. B. Montgomery and J. Terrell, "Some useful information on air-core solenoids", (Air Force Contract AF19(604-7344, 1961).