

3 Tesla 超電導 電磁石의 設計 및 試作

Design and Development of 3 Tesla Superconducting Magnet

韓松暉* · 車貴守** · 洪淳欽** · 金容權** · 崔景達*** · 姜聖秀***

(Song-Yop Hahn · Guee-Soo Cha · Soon-Hum Hong · Yong-Kwon Kim · Kyeung-Dal Choi · Sung-Soo Kang)

Abstract

Superconducting magnet can be employed in many fields, such as, magnet for strong field, superconducting rotating machine and superconducting energy storage system.

In this paper, the solenoid magnet design procedure and materials used in construction are described in detail, and those are the fundamentals of superconducting magnet study. The fabrication and test procedure of 3 Tesla superconducting magnet are also described. Nb-Ti is used as a superconducting wire, GFRP and Kapton are used for electrical insulation. Inner diameter of the magnet is 10 cm.

According to the test results, the field at the central point of the magnet was 3 Tesla, evaporation rate per hour was 2.7 litter and current at that case was 315 A.

1. 序 論

1911년 Onnes가 超電導現象을 발견한 이래 1960 년대에 이르러 그 基礎理論이 확립되었다. 그 후 應用研究가 계속되어 1970년대에 高磁界, 大電流 超電導線이 개발되었다. 이에 따라 선진 외국에서는 高磁界 超電導磁石, 超電導 發電機, 超電導 에너지貯藏裝置 등에 대한 연구가 활발하게 진행되었다.

국내에서는 1982년 처음으로 액체헬륨 발생장치가 도입되어 4.2°K까지의 냉각이 가능하여졌고, 따라서 超電導 應用研究가 시작되었는데 본 연구에서는 초전도 전기기기의 가장 基本이 되는 高磁界 超電導 電磁石을 設計하고 製作하는 기술을 다루었다.

高磁界 超電導 電磁石은 그 사용목적에 따라 설계법이 다른데 본 연구에서는 간단한 均等磁界 솔레노이드 초전도 전자석을 택하였으며 본 연구에서 중점적으로 다룬 내용은 초전도코일 제작 및 극저

온 단열용기의 國內製作 可能性에 대한 試驗研究이다.

2. 초전도 코일

2.1 코일의 사양 및 기본식

초전도 코일을 設計할 때 주어지는 仕様은 보통 보아(bore)의 直徑, 中心部の 磁界, 磁界의 均一度,

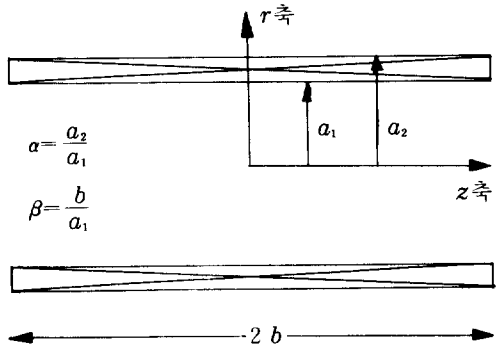


그림 1. 솔레노이드 코일의 치수와 좌표축
Fig. 1. Dimensions and coordinates of solenoid coil.

*正 會 員 : 서울大 工大 電氣工學科 教授 · 工博
 **正 會 員 : 서울大 大學院 電氣工學科 博士課程
 ***正 會 員 : 서울大 大學院 電氣工學科 碩士課程
 接受日字 : 1985年 11月 1日

定格電流 等이다. 그림 1은 솔레노이드 코일의 치수와, 좌표축을 나타낸다. 이 그림에 따라 사양에 나타나는 술어를 풀이하면 아래와 같다.

(가) 中心磁界 B_0

코일 내의 中心磁界 B_0 는

$$B_0 = \mu_0 J a_1 F(\alpha, \beta) \quad [T] \quad (2.1)$$

로 계산되는데 여기서

$$F(\alpha, \beta) = \beta \left(\sin h^{-1} \frac{\alpha}{\beta} - \sin h^{-1} \frac{1}{\beta} \right) \quad (2.2)$$

이고 $J[A/m^2]$ 는 平均電流密度, $a_1[m]$ 은 코일 內半徑, $\alpha = a_2/a_1$, $\beta = b/a_1$ 이다.

(나) 磁界均一度 r

코일의 中心點에서 外側으로 가면 자계의 세기는 점차 감소한다. 그러므로 $z/a_1 = 0.707$ 되는 점에서의 자장의 세기의 감쇠율[%]로서 磁界의 均一度를 표시한다. 이 점에서의 자계의 세기는

$$B \approx B_0 [1 + E_2(\alpha, \beta) / 2] \quad (2.3)$$

로 표시된다.²⁾

여기서 $E_2(\alpha, \beta)$ 는 α, β 에 의해서 결정되는 誤差係數로서

$$E_2(\alpha, \beta) = \frac{1}{2\beta} (C_1^{\frac{1}{2}} - C_3^{\frac{1}{2}}) / F(\alpha, \beta) \quad (2.4)$$

이고

$$C_1 = \frac{1}{1 + \beta^2}, \quad C_3 = \frac{\alpha^2}{\alpha^2 + \beta^2}$$

이다.

그러므로 磁界均一度 $r(\alpha, \beta)$ 는

$$r(\alpha, \beta) = \frac{1}{2} E_2(\alpha, \beta) \times 100 [\%] \quad (2.5)$$

이다.

2.2 設計資料 및 設計順序

(가) 코일 內徑 a_1

보아의 직경이 정하여지면 보빈의 내경이 결정된다. 이 보빈 위에 초전도 코일을 감겨되므로 코일의 내경은 보빈의 두께와 코일 사이의 절연물의 두께를 고려하여 정한다.

(나) 超電導線 直徑 W

초전도선을 보빈에 감을 때 보빈의 직경이 너무 작으면 초전도선에 기계적 스트레스를 주게된다. 이 스트레스가 너무 크면 초전도선의 特性이 감쇠하게 되므로 코일의 內半徑 a_1 과 초전도선의 직경 W 의 비가 식 (2.6)과 같이 되도록 초전도선의 직경을 선정한다.⁴⁾

$$\frac{W}{2a_1} \leq 0.01 \quad (2.6)$$

(다) 平均電流密度 J

초전도선은 그림 2에서 볼 때 실선($T=4.2K$) 아래의 영역에서만 초전도성을 유지한다. 그러므로 動作點은 사용 중의 溫度上昇을 고려하여 이 선보다 낮은 영역에 정해야 하는데 보통은 負荷線(load line) 방법을 이용한다. 즉 코일전류 I_w 에서 코일내의 最大磁場이 B_m 이라고 하면 이에 해당하는 부하선 $O W M$ 을 긋고

$$I_w / I_m \approx 0.6 \sim 0.8 \quad (2.7)$$

이 되도록 I_w 를 정한다.⁵⁾

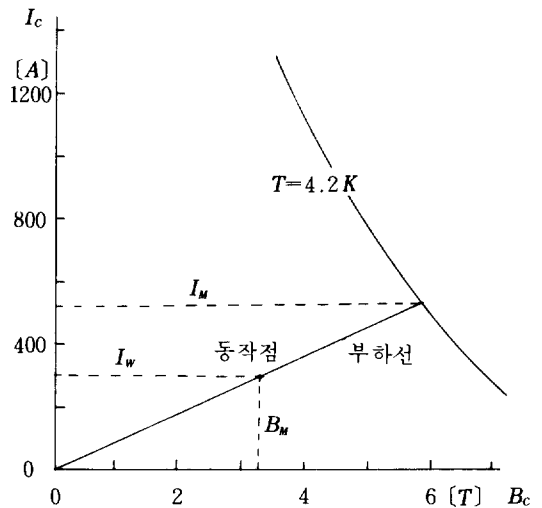


그림 2. 초전도선의 動作電流 결정

Fig. 2. Determination of operating current for superconducting wire.

코일 내에 最大磁場이 생기는 곳은 코일 중앙부의 內측인데

$$B_m = B_0 (1 + 0.64 / 4^{\theta}) \quad (2.8)$$

이 된다.

초전도전선의 단면적이 $A_w[m^2]$ 이고 코일의 점적율이 λ 이면 코일의 平均電流密度 J 는

$$J = \lambda \frac{I_w}{A_w} \quad [A/m^2] \quad (2.9)$$

이다.

(라) 코일의 두께 및 높이

코일 中心磁場 B_0 , 코일 內徑 a_1 , 코일 平均電流 密度 J , 磁界均一度 r 이 결정되면 α, β 가 결정되고 코일의 外半徑 a_2 는

$$a_2 = \alpha a_1 \quad (2.10)$$

코일의 높이 $2b$ 는

$$b = \beta a_1 \quad (2.11)$$

로부터 구하여진다.

해석적으로 α, β 를 구하는 것은 복잡하므로 이것을 도표에서 구할 수 있도록 한 것이 그림 3이다. F 와 r 값을 알면 이 그림에서 이에 해당하는 점을 구하고 이 점의 횡축 및 종축의 座標를 읽으면, α, β 가 쉽게 구하여진다.

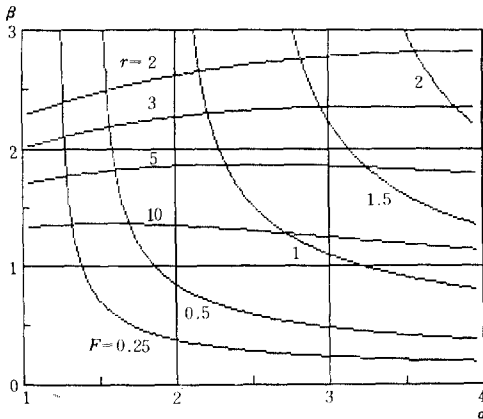


그림 3. $z/a_1=0.707$ 인 점에서의 등 r (α, β) 및 등 F (α, β) 선
Fig. 3. Line of constant r (α, β) and constant F (α, β) at normalized point $z/a_1=0.707$.

3. 低温容器 (Cryostat)

크라이오스타트는 超電導코일을 임계온도 이하로 냉각시켜 초전도성을 유지시켜 주는 斷熱容器이다. 저온용기 내에는 액체헬륨이 담겨있고 여기에 코일을 넣어 코일을 4.2K로 유지시켜 준다. 이 액체헬륨의 증발을 막기 위해서 외부로부터의 열침입을 줄여야 하는데 그림 4는 이와같은 목적으로 設計된 典型的인 低温容器的 構造이다.

여기서는 용기내부 원통의 열손실을 分析하고 원통을 설계하는 수식을 소개한다.

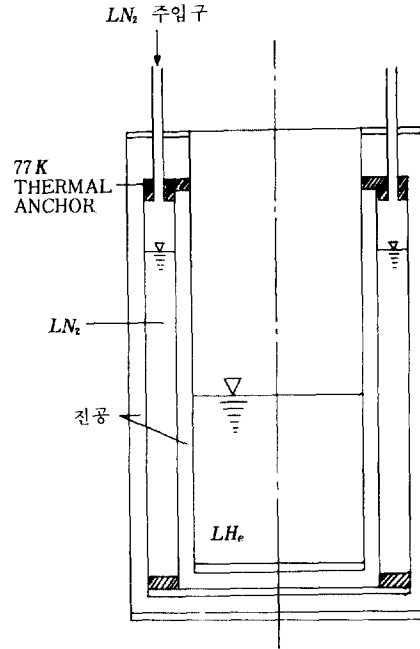


그림 4. 저온 용기 구조
Fig. 4. Typical cryostat.

3.1 熱傳達

(1) 容器 벽을 통한 傳導熱

용기의 상부는 상온이고 하부는 4.2°K이므로 上部로부터 傳導에 의하여 熱이 액체헬륨 속으로 침입한다. 이때 전달되는 熱量 Q_c 는

$$Q_c = \lambda A (T_2 - T_1) / L \quad [W] \quad (3.1)$$

여기서 λ 는 熱傳導係數 [$W/cm \cdot K$], A 는 원통벽의 斷面積 [cm^2], L 은 溫度 T_2 및 T_1 인 부분의 거리 [cm]이다.

(2) 측면 및 밑면을 통한 熱傳達

측면 및 밑면으로부터의 열침입을 줄이기 위해 용기 주위에 진공벽을 두었다. 따라서 傳導 및 對流에 의한 熱損失은 없고 단지 輻射에 의한 열손실만 있게 된다. 복사에 의한 熱傳達量 q_r 은

$$q_r = \sigma \epsilon (T_2^4 - T_1^4) \quad [W/m^2] \quad (3.2)$$

이다. 여기서 σ 는 Stefan 상수로서 $5.67 \times 10^{-8} [W/m^2 \cdot ^\circ K]$ 이고 ϵ 는 방사계수인데 두면의 방사율이 $\epsilon_1 = \epsilon_2 = \epsilon_0$ 이면 $\epsilon = \epsilon_0 / 2$ 가 된다.

(3) 上部로부터의 輻射熱 傳達

용기의 상부에는 플랜지가 있어 여기에서 液體헬

를 속으로 복사열이 전달된다.

3.2 熱絶緣

앞절에서 저온용기의 내부원통으로 침입하는 熱量을 定量的으로 다루었다. 이 열손실을 줄이기 위해 低温容器的 構造를 그림 4 와 같이 하였다. 여기에 쓰인 구조재는 SUS 304 스텐레스 강판이다.

(1) 원통의 측면 및 밑면을 통하는 輻射熱을 줄이기 위하여 진공벽을 두고 그 중간에 77°K의 액체질소자켓을 둔다. 따라서 측면 및 밑면의 面積을 S' [m^2] 이라면 内部원통으로 침입하는 輻射熱 Q_r 은

$$Q_r = 5.67 \times 10^{-8} \cdot (77^4 - 4.2^4) \cdot \frac{\epsilon_0}{2} \cdot S' [W]$$

이고 이것을 액체헬륨증발량으로 換算하면

$$Q_r (LHe) = 0.091 S' [L/H] \tag{3.3}$$

이다. 단 $\epsilon_0 = 0.06$ 으로 하였다.

(2) 원통의 上部로부터 液體헬륨에 전도되는 熱量을 줄이기 위해 원통상부에 せ면 앵커(thermal anchor)를 설치하고 상부에서 침입하는 열을 액체질소자켓으로 내보낸다. 따라서 액체헬륨으로 침입하는 熱量은 액체헬륨증발량으로 換算하면³⁾

$$Q_c (LHe) = 4.8 \frac{A}{L} [L/H] \tag{3.4}$$

단 熱傳達係數 $\lambda = 0.04$ 이다.

(3) 상부로부터 침입하는 복사열을 줄이기 위해 플랜지에 여러장의 버플(buffle)을 設置한다. 그 매수를 n , 원통의 상부면적을 S' [m^2]라하면 액체헬륨증발량으로 환산한 복사열은

$$Q'_r (LHe) = \frac{19.9}{n+1} S' [L/H] \tag{3.5}$$

이다.

3.3 용기두께

低温容器는 一般的으로 실린더형 원통을 사용한다. 사용하는 剛板의 두께를 두껍게 하면 機械的强度가 높아져서 安守하지만 이것을 통하여 熱傳導가 커지기 때문에 가능한 한 얇은 板을 사용한다. 용기내에 壓力이 생기면 鐵板에는 주변방향 스트레스(Circumferential Stress)가 생겨 이것에 견딜수 있는 두꺼운 鐵板을 사용해야 한다. 内部壓力 P [kg/cm^2], 원통직경 D [cm], 판의 두께 t [cm], 판의 인장강도 σ [kg/cm^2]이라면

$$t \geq \frac{PD}{2\sigma} \tag{3.6}$$

의 관계가 있다.

4. 電流導入線

外部로부터 超電導코일에 전류를 공급하는 도선을 電流導入線(current lead)이라 한다. 이 導入線을 통해서 액체헬륨 속으로 흘러들어가는 열침입을 最小로 하는 것이 設計의 目標이다. 熱源은 도입선 상부로부터의 傳導에 의한 것과 導入線의 抵抗에 의한 것이다.

導入線의 단면적을 크게하면 前者의 열침입이 증가하고 後者의 열침입은 감소한다. 단면적을 작게하면 反對現象이 일어나므로 열침입이 最小가 되는 最適 斷面積이 있게 된다.

4.1 精密設計

그림 5는 典型的인 電流導入線을 나타낸다.

- K : 열전도율 A : 도체단면적
- h : 열방출계수 p : 도체주변길이
- ρ : 도체의 비저항 I : 도체의 전류
- T : 도체의 온도 t : 헬륨가스의 온도
- C_L : 헬륨의 기화열 C_p : 헬륨의 비열
- m : 헬륨의 단위 시간당 증발량

이라 하면, 전류도입선의 溫度方程式은

$$\frac{d}{dx} \left[K(T) A \frac{dT(x)}{dx} \right] - hp [T(x) - t(x)] + \frac{\rho(I)^2}{A} = 0 \tag{4.1}$$

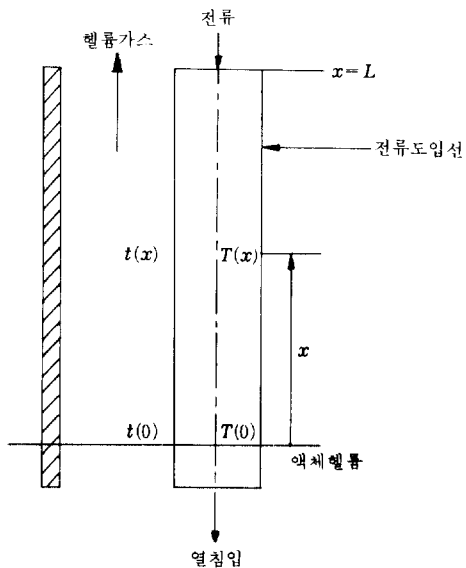


그림 5. 電流導入線의 모형
Fig. 5. A model of current lead.

이다. 전류도입선에서 放出되는 熱量은 주위의 헬륨가스를 가열하게 되므로

$$hp[T(x) - t(x)] = mC_p \frac{dt(x)}{dx} \quad (4.2)$$

이고 이때의 경계조건은

$$T(0) = t(0) = 4.2K, \quad T(L) = 300K \quad (4.3)$$

이다. 또한 헬륨의 증발량은 電流導入線 下端에서 액체헬륨으로 전달되는 열량에 비례하므로

$$mC_L = -K(T) A \left. \frac{dT(x)}{dx} \right|_{x=0} \quad (4.4)$$

이다. 식 (4.3) 및 식 (4.4)의 條件하에서 식 (4.1)과 식 (4.2)를 풀면 헬륨의 單位時間當 증발량 m 이 계산되는데 도입선의 단면적 A 와 길이 L 을 바꾸면서 증발량 m 이 最小되는 條件을 구한다.

4.2 간이설계

전류도입선에서 헬륨가스로 放出되는 熱量은 電流導入線의 온도구배에 비례하므로

$$hp[T(x) - t(x)] = f m C_p \frac{dT(x)}{dx} \quad (4.5)$$

이다. 여기서 f 는 熱傳達效率이다. 식 (4.5)를 식 (4.1)에 대입하고

$$dx = \frac{I dx}{K(T) A}, \quad W = mC_L$$

$$\frac{C_p}{C_L} = U, \quad \rho(T) K(T) = L_0 \theta$$

로 치환하면

$$\frac{d^2T(z)}{dz^2} - \frac{fWU}{I} \frac{dT(z)}{dz} + L_0 \theta = 0 \quad (4.6)$$

이고 위에서 L_0 는 Lorentz 수이다. 식 (4.6)은 해석적으로 풀이가 되고 열침입이 최소가 되는 조건을 구하여보면 아래의 설계자료를 얻을 수 있다.

導入線電流가 I_0 일 때 導入線 길이 L_0 와 斷面積 A_0 와의 관계는

$$\frac{I_0 L_0}{A_0} = 3.5 \times 10^6 \text{ [A/m]} \quad (4.7)$$

이고 보통 L_0 는 0.5~1[m]의 범위내에서 선택된다. 이때의 무부하 열손실 W' 및 부하전류 I_0 일때의 열손실 W_0 는 각각

$$\frac{W'}{I_0} = \begin{cases} 0.7 \times 10^{-3} \text{ [W/A]} & (\text{고순도황}) \\ 0.4 \times 10^{-3} \text{ [W/A]} & (\text{황 동}) \end{cases} \quad (4.8)$$

$$\frac{W_0}{I_0} = 1.04 \times 10^{-3} \text{ [W/A]} \quad (4.9)$$

식 (4.7)과 식 (4.9)를 보면 결과식이 電流導入線의 材質에는 관계가 없다. 식 (4.8)은 材質에 따라 그 값이 많이 변화함을 알 수 있는데 도전율과 열전도율이 낮은 재질이 더 유리하다.

5. 設計事例 및 試作

보아의 直徑 10[cm], 코일전류 300[A], 中心部の 磁界 3[T], 磁界均一度 3[%]인 초전도자석을 設計하고 그 製作過程을 기술하면 아래와 같다.

5.1 超電導코일

(가) 보빈: 두께 3[mm], 내직경 9.8[cm]의 SUS 304 스테레스 파이프를 사용하고 上端 및 下端에 두께 6[mm]의 원판을 溶接하여 製作하였다. 보빈과 초전도코일 사이의 電氣的 絶緣을 위하여 두께 1[mm], 폭 5[mm]의 에폭시 그래스(Epoxy glass)를 스페이서(Spacer)로 사용했다.

(나) 超電導코일: 코일은 表 1과 같은 Nb-Ti材를 택하였다. 그림 2의 곡선은 ($T_c=4.2K$) 表 1의 초전도선에 대한 임계온도곡선이다. $B_m \approx 1.1 B_0 = 3.3$ [T], $I_w = 300$ [A]를 動作點으로 하면 식 (2.7)과 잘 부합한다. 이 선으로 卷線할 때는 層間에 두께 0.05[mm]의 절연지(Kapton)을 사용한다. 따라서 이 코일의 점적율은 0.68, 평균전류밀도는 184.6[A/mm²]이다. 식 (2.1)에 의하여 $F(\alpha, \beta) = 0.248$ 이므로 그림 3에서 $r = 3$ [%]인 점을 택하면 대략 $\alpha = 1.3$, $\beta = 2$ 가 된다.

表 1. 超電導線 規格

Table 1. Specification of superconducting wire.

재질	Nb-Ti
도체 직경	1.19mm ϕ (절연상태 1.125mm ϕ)
필라멘트	32 μ m ϕ , 511개
절연내력	2400V (4.2K) 이상
동/초전도체의 비	1.7
임계전류 (4.2K)	1120A (4 T) 785A (5 T) 488A (6 T)

실제로는 超電導線을 層당 170회씩 12층을 감았는데 이때 코일에 5[kg]의 장력을 주면서 감았다. 제작된 코일에 대하여 α, β, F, r 을 다시 計算한 결과

$$\alpha = 1.3 \quad \beta = 2.04 (2b = 21.2 \text{ [cm]})$$

$$F = 0.25 \quad r = 3.1 \text{ [%]}$$

가 되었다. 또 코일 外例에는 코일에 作用하는 電

磁力를 줄이기 위하여 직경 1[mm]의 SUS304 스텐레스 강선을 감았다. 그림 6 은 設計된 超電導 電磁石의 斷面이다.

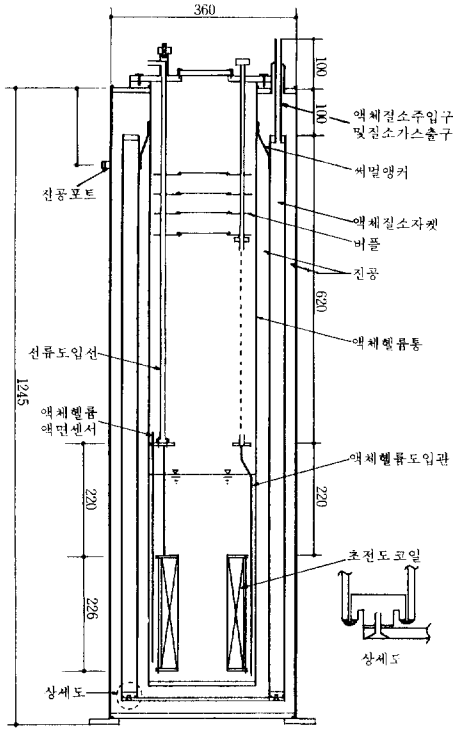


그림 6. 초전도 전자석 설계도면
Fig. 6. Design sheet of superconducting magnet.

5.2 크라이오스타트

(가) 내부원통

내경 21[cm], 높이 118[cm]인 액체헬륨통을 제작한다. 이 통의 内部는 壓力이 靜止狀態에서 0.3~0.5[kg/cm² gage]인데 비상시 2氣壓까지 상승하는 것으로 가정한다. 따라서 통내외의 壓力差는 3기압으로 設計한다. SUS 304 스텐레스 강관의 허용인장강도는 安全率을 고려하여 20[kg/mm²]로 한다.

식 (3.6)에 의하면

$$t \geq \frac{3 \times 10^{-2} \times 210}{2 \times 20} \approx 0.15[\text{mm}]$$

이다. 원통의 機械的 強度面에서 볼 때 관의 두께를 두껍게 하면 좋으나 앞에서 기술한 바와 같이 열손실이 커지기 때문에 가능한한 얇은 것을 택해야 한다. 또한 밑부분을 용접하는 경우 냉기누출(Cold-

leak) 이 생기지 않게 하려면 너무 얇은 판은 곤란하다. 본 연구에서는 용접에 대한 신뢰성을 높이기 위해 3[mm] 판을 사용하였다.

(나) 액체질소자켓

두께 3[mm]의 스텐레스 강관으로 동심 원통을 형성하였다. 상부에는 직경 10[mm]의 액체질소 入口와 질소가스 出口를 각각 1개씩 설치하였다. 밑면에는 5[mm] 두께의 원판을 자켓에 나사로 조여 붙였고 따라서 이 부분의 온도도 77°K로 유지되도록 하였다. 또 액체질소자켓 上部와 액체헬륨통 사이에 두께 2[mm]의 구리판을 環狀으로 溶接하여 씨멀앵커를 형성하였다.

(다) 眞空筒

두께 3[mm]의 스텐레스 강관을 원통형으로 구부러 제조하였다. 이 통 内部는 眞空으로 해야하므로 진공포트 1개를 설치했다. 이 포트의 마개는 内部의 壓力이 1 氣壓보다 높아지는 경우 自動으로 열리도록 하여 통의 폭발을 防止한다.

5.3 플랜지

톱 플랜지에는 電流導入線, 液體헬륨주입구, 헬륨가스배출구, 모니터용 커넥터, 安全弁 및 破製弁이 設置되어 있다. 플랜지의 下端에는 超電導코일이 연결되어 있으며 플랜지 中間에는 銅板으로 된 4개의 버플이 設置되어 복사열을 차폐한다.

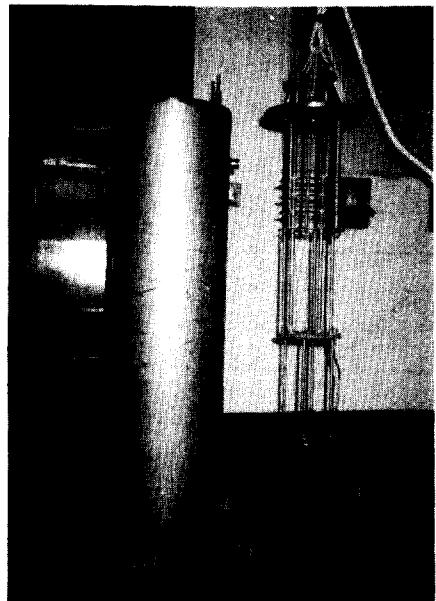


그림 7. 제작된 초전도 전자석
Fig. 7. Superconducting magnet constructed.

電流導入線은 길이 70[cm], 직경 12.8[mm], 두께 1.6[mm]의 銅파이프를 사용하였는데 증발된 헬륨가스는 이 속을 통과하면서 導入線을 냉각한다. 이 導入線의 最適電流는 식 (4.7)에 의하여

$$I_0 = \frac{3.14 \times 12.8 \times 1.6 \times 10^{-6}}{0.7} \times 3.5 \times 10^6 = 321[A]$$

이다. 그림 7은 제작된 초전도전자석을 나타내는데 오른쪽이 플랜지 및 코일이고, 왼쪽이 저온용기의外觀이다.

6. 特性試驗

製作된 코일을 플랜지에 연결한 다음 플랜지를 크라이오스타트 위에 조립한다. 우선 진공펌프를 진공포트에 연결하여 진공벽의 眞空도가 80[ppm] 될 때까지 공기를 뽑은 후 밸브를 닫는다.

6.1 코일냉각

액체질소를 액체헬륨주입구를 통하여 코일에 注入시킨다. 코일의 溫度가 常溫에서부터 점차 떨어지기 시작하면 코일의 抵抗이 점차 감소하기 시작하는데 약 40분 후에 코일의 抵抗이 18[Ω]에서 2.7[Ω]으로 떨어져서 一定하게 되었다. 이때가 코일온도가 77[°K]로 된 상태이며 진공벽의 진공도는 10[ppm] 정도까지 떨어졌다.

약 1시간정도 放置한 후 질소가스를 注入하면서 그 속의 액체질소를 추출하면서 액체질소 자켓에도 액체질소를 주입한다. 헬륨통 내부의 질소와 공기를 완전히 추출하고 곧 이어서 液體헬륨을 注入하

는데 크라이오스타트 下部에서부터 液體가 차오르도록 한다. 약 40분 후에 코일저항은 완전히 零으로 되었다. 이때의 진공벽의 진공도는 1[ppm]이하로 떨어졌다. 그림 8은 냉각과정의 코일저항변화를 나타낸다.

6.2 코일

코일이 4.2°K로 냉각된 후 直流電源을 코일에 連結하여 코일의 電流를 10[A/sec] 정도로 서서히 增加시키면서 코일 中心의 磁場을 測定하였다. 그 結果, 電流가 310[A]에서 코일 中心의 磁場이 3[T]가 되었고 電流를 계속 增加시킨 결과 316[A]에서 퀴치가 發生하였다.

이것은 設計値보다 매우 낮은 값인데 초기시간경과 후에는 이 값이 더욱 改善될 것으로 豫想된다.²⁾ 定格電流에서의 액체헬륨소비량은 약 2.7[L/H]로서 設計値와 잘 一致하고 있다.

7. 結 論

본 研究의 目的은 超電導應用 電氣機器의 研究開發에 가장 基本이 되는 超電導 電磁石의 設計 및 製作技術을 確立하는데 있다.

우선 초전도코일, 低溫容器 및 電流導入線의 설계에 필요한 기본식을 도입하고 設計方法을 확립하였으며, 코일 捲線法, 低溫容器 製作方法등을 提示하였다. 中心磁場이 3[T]인 超電導磁石을 설계하여 제작한 후 試驗한 결과 설계치와 비교적 잘 一致하였으며 냉기누출 등의 문제가 생기지 않고 안정하게 動作하였다.

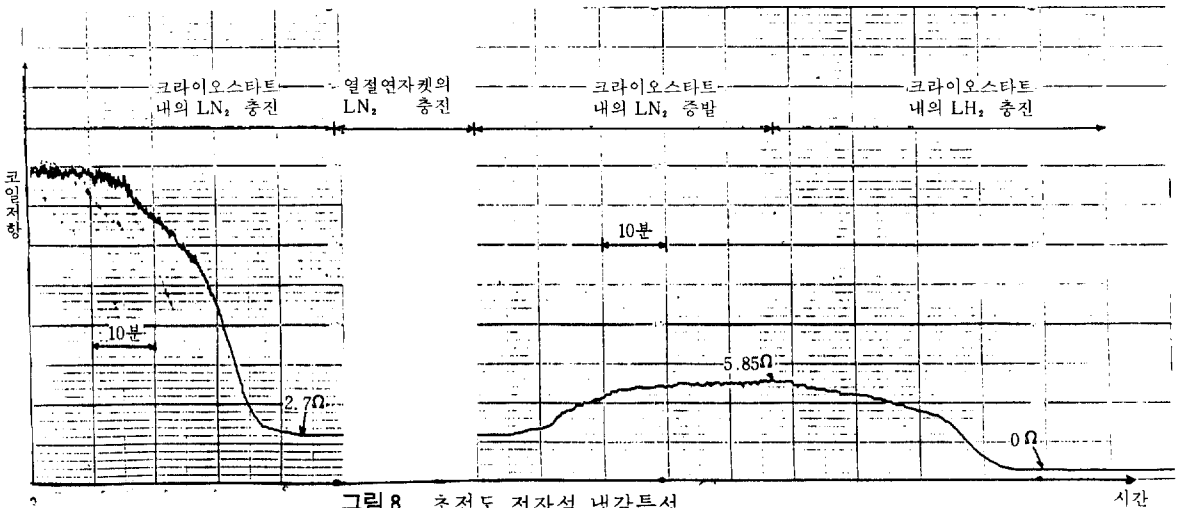


그림 8. 초전도 전자석 냉각특성
Fig. 8. Cooling of superconducting magnet.

본 연구를 통하여 國內에서도 앞으로 高磁界 超電導磁石은 물론 초전도 회전기, 초전도 자기부상장치, 초전도 NMR CT 등의 연구개발이 可能할 것으로 사료된다.

끝으로 본 연구는 한국과학재단 및 금성전선주식회사의 연구비 지원으로 이루어졌음을 알린다.

參 考 文 獻

1) D. B. Montgomery and R. J. Weggel, "Solenoid Magnet Design", Robert E. Krieger Publishing

Co., 1980, p. 4

2) 上 同, pp. 232-237

3) 上 同, pp. 183-186

4) T. Shintomi, National Laboratory for High Energy Physics, Japan, Personal Communication

5) 上 同, Personal Communication

6) M. N. Wilson, "Superconducting Magnets", Clarendon Press, 1983, pp. 256-257

7) 上 同, pp. 68-69

8) V. L. Newhouse, "Applied Superconductivity Vol. 2", Academic Press, 1979, p. 405