

25KJ 超電導 에너지 貯藏裝置의 設計, 製作 및 그 特性 試驗

A Study on the Design, Fabrication and Characteristics Test of 25KJ Superconducting Magnetic Energy Storage

洪 元 杓* · 元 鍾 洙** · 韓 松 曄** · 李 承 元**
(Won-Pyo Hong · Jong-Soo Won · Song-Yop Hahn · Sung-Won Lee)

요 약

電力需要의 계속적인 증가와 負荷率의 低下에 따른 電力의 合理的이고 經濟的인 運用을 위하여 高 效率과 高速應性을 갖는 超電導貯藏裝置의 電力系統 적용 가능성은 더욱 증대되고 있다. 본 論文에 서는 이와같은 배경에서 超電導에너지 저장장치 의 기본원리를 확인하기 위하여 솔레노이드 형태의 에 너지저장장치의 각 구성요소인 초전도코일, 電流導入線, 보온용기(Cryostat), 測定 및 保護시스템 에 대한 基本原理, 設計方法과 製作節次에 대하여 기술하였다. 특히 超電導코일 및 電流導入線의 새 로운 設計方法를 제안하였으며 이 방법은 시제품 제작을 통하여 實驗的으로 증명되었다. 제작된 이 장치의 最高動作電流는 200A에서 저장에너지와 最大磁場이 각각 2500J과 3.52J이며 코일은 17층과 길 이 1923mm인 NbTi 超電導線材로 구성되었으며 이 線材의 직경은 0.9mm이며 코일의 외경은 10cm이다. 이 장치의 交流損失, 保護장치와 充·放電 實驗을 통하여 저장장치의 열적 및 기계적 安定性을 실험 적으로 확인하였으며 실험결과 설계치와 비교적 잘 일치하였다.

Abstract-For the economical and reasonable operation of electric power system according to continual increase of electric power demand and decrease of load factor, the potential application of superconducting magnertic energy storage [SMES] with high efficiency and fast response in the electric utility is receiving attractive attension. In the light of this background, to confirm the basic principle of SMES, theoretical study, design technique and fabrication procedure for superconducting coil, current lead, cryostat, measuring and protection system of SMES are described in detail. Especially, a new design technique for superconducting coil and current lead is porposed and it was proved experimentally by the performance test of SMES which is developed for the first time in our country. At the peak operating current 200A, the maximum magnetic field and stored energy of the coil are 3.52T and 2500J, respectively. The thermal and mechanical stability of 2500J SMES is also confirmed experimetally by its characteristics test, AC loss, protection system, charge and discharge test. The experimetal results show good characteristics of energy storage system.

1. 序 論

*正 會 員 : 서울대 大學院 電氣工學科 博士課程

**正 會 員 : 서울대 工大 電氣工學科 教授

接受日字: 1988年 5月 12日

1次修正: 1988年 8月 12日

産業化와 文化수준의 향상에 따른 電力需要의 증 가와 負荷率의 低下 그리고 운전비 절감을 위한 大 容量 發電所의 系統병입으로 電力의 경제적이고 합

리적인 운용을 위하여 高効率 및 高速應性電力貯藏 장치가 절실히 요구되는 실정이다. 현재 대규모 電力貯藏裝置로 실용화되고있는 양수발전은 효율이 낮고(67~75%) 임피조진등에서 제약을 받는 단점이 있고 축전기, 壓縮空氣 및 푸라이휠 저장등은 소규모 저장장치이기 때문에 電力의 合理的 이용 측면에서 기여는 거의 없다. 그러나 1960年代들어 액체 헬륨으로 냉각하는 높은 임계온도와 磁束密度를 갖는 제2종 초전도체의 發見으로 超電導코일에 의한 電力貯藏에 관한 研究가 1970년 부터 미국 Wisconsin 그룹에서 시작하여 에너지 저장장치의 개념적인 設計¹⁾ 및 경제성 평가^{2),3)}를 완료한 바 있으며 일본 구미 각국에서도 다양한 용도의 저장장치 연구가 진행되고 있다.⁴⁾ 특히 최근 高溫超電導體(액화 질소냉각가능)의 發見으로 이 導體의 線材化 研究가 진행되고 있는바 만약 실용화된다면 大容量 超電導 에너지貯藏裝置의 실용화 문제점인 경제성 및 신뢰성을 획기적으로 向上 시킬 것으로 예상되어 이 저장장치의 電力系統 적용에 새로운 전기가 될 것으로 보인다.^{5),10)} 이 저장장치는 일반적으로 利用하는 II 的에 따라 순수 에너지貯藏用^{5),6)}과 電氣機器 분야에 이용하는 磁界 發生用 초전도 마그네트로 크게 나눌 수 있으며 각각의 設計·製作방법이 아주 다르기 때문에^{7),8)} 특수한 설계방법을 필요로 하며 특히 퀴엔치 절연, 안정성 및 냉각관점에서 높은 技術的인 이론과 경험이 필요하다.⁷⁾ 국내에서는 1982년 처음으로 헬륨액화 장치를 도입하여 소규모 응용연구가 시작되어 초전도電磁石에 대한 비교적 간단한 設計와 제작⁹⁾에 관해 다루었지만 초전도에너지저장장치 시스템 관점이 아니며 에너지貯藏裝置의 기본특성을 도출하는 重要한 시험을 다루지 못하였다. 따라서 本 論文에서는 솔레노이드 형태의 소형에너지저장용 및 펄스마그네트 設計에 利用이 가능할 뿐만 아니라 中容量 超電導에너지貯藏裝置 設計에서도 부분적 수정을 통하여 利用이 가능하도록 해석방법과 설계방법을 제시하고, 특히 초전도 코일과 電流리드선의 새로운 設計技法를 이용한 소규모 超電導 에너지 저장장치를 제작 그 특성試驗을 실시하여 제안된 設計技法의 타당성을 檢證하고 이 장치의 基本特性를 도출함으로써 超電導 貯藏裝置의 국내제작 가능성에 대한 試驗研究를 최초로 수행하였음을 보고한다.

2. 設計 및 裝作

超電導에너지貯藏裝置는 그림 1에서와 같이 초전

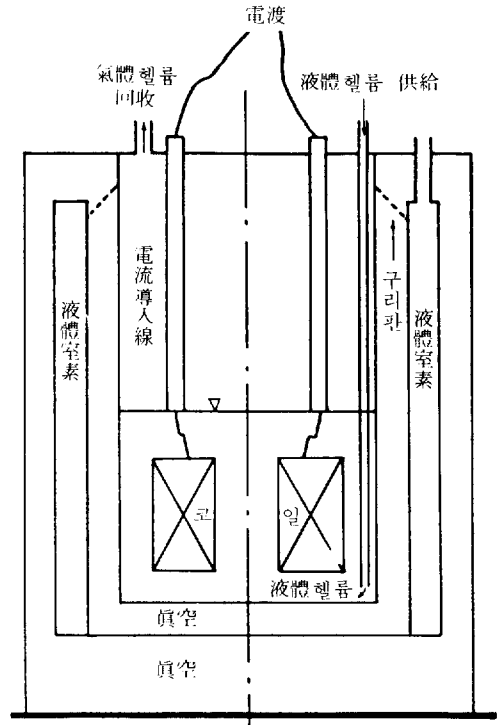


그림 1 소형초전도 에너지저장장치의 개념도
Fig. 1 Conceptual diagram of a small scale SM-ES system.

도코일 極低溫 補溫容器(Cryostat)와 측정, 保護裝置로 구성되며 本 연구에서는 여자速度가 수십초에서 수분인 2500J 貯藏容量을 갖는 솔레노이드형 저장장치로 設計와 製作하는 方法은 다음과 같다.

2.1 超電導 코일의 設計 및 製作

에너지저장용 초전도코일은 통상 경제적인 이유로 솔레노이드형을 채용하고 있다. 여자速度에 따라 線材와 권선하는 方法이 결정되며 초단위 充放電을 行하는 코일에서는 磁束變化에 따른 交流損失이 필히 고려된 超電導線을 使用해야하는데 銅比(銅(matrix) / 초전도선량)가 적고 필라멘트(filament) 직경이 작으며 트위스트피치(twist pitch)가 적은 線材를 使用해야한다. 코일電流는 發生磁界, 저온용기의 크기 냉각상태등을 고려하여야 한다.

動作電流 선정

초전도선재는 표준품으로 기계적 유연성이 좋은 NbTi線을 택하였다. 그림 2에서 볼때 T_c 곡선은 NbTi 표준품의 임계전류특성곡선으로 아래 영역에서 超電導性을 유지하게 된다. 動作點을 결정하기 위하여 여자전류대 최대자장의 관계는 직선이 되는

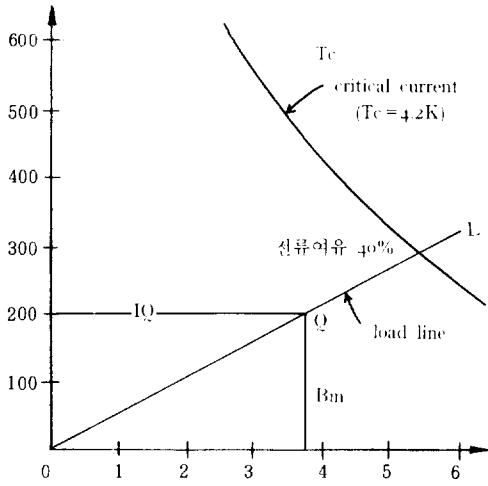


그림 2 0.9mm 초전도선의 임계전류와 부하곡선
 Fig. 2 Critical current of 0.9mm superconducting wire & load line of 2500J coil.

데 코일電流 I_0 에서 최대자장을 B_m 이라 하면 이에 해당하는 $0QL$ 의 부하직선을 그린다. 이 초전도코일을 안정하게 운전시키기 위하여 臨界狀態에 대하여 적당한 여유를 두어야 하는데 負荷置線上에서 $I_0 / I_{c1} = 0.6 \sim 0.8^*$ 이 되도록 I_0 를 정한다. 본 研究에서는 전류여유를 약 40%로 하여 200A로 선정하였다. 超電導線의 銅(mat rix) / 超電導單面積比는 웬치방지 및 交流損失 觀點에서 결정되어야 하나 본 연구의 경우 실험용이기 때문에 2로 선정하였다. 또 코일의 內徑 a_1 은 기계적 강도와 절연물의 두께를 고려하 超電導線의 직경에 의하여 실험적으로 (1) 식과같이 계산한다. 여기서 W 는 초전도선의 직경이다.

$$\frac{W}{2a_1} \leq 0.01 \tag{1}$$

표준품인 NbTi線의 직경 W 가 0.9mm로 (1)식에 의하여 內徑은 50mm이상 이어야하며 설계에서는 80mm로 하였다. 또 인덕턴스는 最大動作電流 200A에서 2500 J 저장에너지 조건을 만족해야 하기 때문에 $\frac{1}{2}LI_2$ 의 식을 利用하여 구하면 1.25H 이상이어야 한다.

2.2 設計內容

設計조건을 만족하는 코일사양을 결정하기 위하여 最大磁束密度, 코일體積, 길이 및 인덕턴스 기본식을 도출한다. 먼저 솔레노이드 中心의 磁場계산식은 (2)식과 같으며

$$\beta_0 = j \times a_1 \frac{4\pi\beta}{10} \ln \frac{\alpha + (\alpha^2 + \beta^2)^{1/2}}{1 + (1 + \beta^2)^{1/2}} \tag{2}$$

여기서 j 는 전류밀도[A/cm²], λ 는 Space factor a_1 은 코일의 內반경[cm] b 는 코일의 높이[cm], $\alpha = a_2/a_1$, $\beta = b/a_1$ 이다. 또 도체의 길이는 전체 체적 V 에 단위면적당 권수 n 를 곱하므로 얻을 수 있고도 체적이 1은

$$l = n \cdot V = \frac{\lambda}{s} \cdot a_1^3 \cdot 2\pi\beta(\alpha^2 - 1) \tag{3}$$

로 계산되며 여기서 s 는 도체단면적[cm²]이다. 最大磁場 계산은 Legendre Polynomial를 포함한 수열로서 표시할 수 있으며 솔레노이드에서는 코일 中心平面에서 코일내측에 최대자장을 가지므로 간략히시켜 (4)식으로 나타낼 수 있다.

$$B_m = B_0 \left(1 + \frac{0.64}{4\beta^2} \right) \tag{4}$$

여기서 B_0 는 中心磁場이다. 마지막으로 인덕턴트 계산은 무한히 긴 솔레노이드인덕턴스 식 $L_0 = \pi\mu_0 n^2 a_1$ (H/m)를 利用하여 코일 길이는 유한하고 두께를 가지고 있음으로 修正계수를 導入한 Nagaoka 식에 의하여 산출한다. 이 식에서 인덕턴스는(5)식으로 표시된다.

$$L = 0.01973 N^2 \left(\frac{2a_1}{b} \right) a_1 \cdot k' \times 10^{-6} \text{ [H]} \tag{5}$$

여기서 a_1 는 코일幅, b 는 코일길이, N 은 총권선회수, $k' = k - c$ 로 k 는 Nagaoka 상수인 코일길이에 대한 補償常數이고 c 는 코일 폭에 대한 보상수이다. 즉 $b = \infty$ 이면 $k = 1$ 이고 $c = 0$ 이면 $k' = 1$ 무한 솔레노이드 인덕턴스 계산식이 된다. 표 1은 內반경을 일정하게 하고 코일높이를 설계조

표 1 초전도 저장장치 사양을 결정하기 위한 설계사례

Table 1 Calculated design examples for determining specification of SMES.

길이 (cm)	層數 (T)	中心磁場 (T)	最大磁場 (T)	인덕턴스 (H)	도선길이 (m)
15	19	3.37	3.96	1.26	1,814
16.5	18	3.39	3.91	1.28	1,878
17	18	3.44	3.95	1.33	1,935
18	17	3.36	3.81	1.28	1,923
18.5	17	3.40	3.84	1.32	1,976
20	16	3.33	3.71	1.29	1,997
20.5	16	3.37	3.73	1.34	2,047
22	15	3.26	3.57	1.28	2,046
22.5	15	3.29	3.59	1.32	2,093

표 2 25KJ 초전도 저장장치 사양
Table 2 Specification of 25KJ SMES.

형식	Solenoid
저장에너지	2500J
인덕턴스	1.25H
초전도코일크기	내반경; 8 cm 외반경; 10cm 높이; 18cm
초전도선재	직경; 0.9mm 재료; NbTi CU/SC; 2 필라멘트직경; 20 μ m 필라멘트 수; 675개 트위스트피치; 15mm 절연물두께; 30 μ m
자장밀도	최대; 3.63(T)
최고동작전류	200A
도선총길이	1923m
코일총수	17

건을 만족하는 예를 나타낸 것이다. 여기서 코일높이가 15cm인 것이 導體길이 가장 짧으나 最大磁場이 크고 또 코일높이가 22cm인 것은 최대자장은 작으나 도선길이가 너무 길다. 따라서 코일높이 18cm, 층수17인 설계치가 最大磁場과 도선길이로 보아 적합하고 설계된 초전도에너지 저장 장치의 사양은 표 2과 같다.

2.3 超電導코일의 製作

보빈(Bobbin)은 交流損失을 줄이기 위하여 GF-RP(Glass Fiber Reinforced Polymer)를 사용하였다. 코일과 코일사이엔 액체헬륨이 잘 통과하도록 0.5t GFRP 스페이서를 코일 매 2층마다 넣었다. 코일을 권선할때는 5kg 장력을 주었고 코일 외측에는 電磁力에 견디기 위하여 CuNi보강권선 1층을 감았다. 코일온도를 測定하기 위하여 코일내부 중간층 및 코일외측에 Au/Fe-Chromel 열전대를 設置하였으며 초전도코일의 漚치特性을 파악하기 목적으로 실린더 中央외측에는 폭1[cm] 길이0.5[cm]의 홈을 파고 4.2[k]에서 低抗이 20[Ω]이고 定格電流가 1[A]인 콘스탄탄 히터를 設置하였다. 역시 코일의 磁場을 測定하기 위하여 RHY 17 흡소자를 실린더 내측中心에서 2[cm] 낮은 곳에 설치하였다. 특히 코일漚치를 檢出하기 위하여 코일시작 중간및 끝에서 3개의 전압선을 끌어내었는데 이들은 漚치

시 높은 전압이 유기되기 때문에 다른 센서와 별도로 저온용기 밖으로 인출하였다.

2.4 交流損失

高臨界電流密度 高臨界磁界를 갖는 제 2종 초전도체는 변화하는 자계내에서 損失를 발생하며 導體의 임계전류 밀도를 低下시키고 漚치를 유발시킬 수 있다. 따라서 損失의 精確한 계산은 에너지저장장치設計에 대단히 重要하다. 이 손실로는 필라멘트를 高電導率의 상도체에 심어넣은 복도체가 변화하는 자계내에서 양자화된 자속운동으로 發生하는 히스테리시스損失과 電磁的 結合에 의하여 發生하는 結合損失이 있다. 그러나 코일모양 및 외부자계 영향등으로 精確한 모델링은 어렵지만 여기서는 内部磁界는 선형적 分布를 갖는 Bean 臨界狀態모델을 이용하여 히스테리시스손은 (6) 식으로 結合損失은 (7) 식으로 유도했다.

$$W_h = \frac{\lambda J_c \cdot H_0}{2 \times 10^8} \cdot v \cdot d \cdot V \cdot I_n \frac{H_{max} + H_0}{H_0} [w] \quad (6)$$

$$W_c = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot \frac{1}{\rho_c} \left(\frac{B' l_D}{2\pi} \right) L [w] \quad (7)$$

(6)과 (7)식에 사용된 인자들은 부록 I 에 설명하였다. 또한 실험적으로 交流損失을 실측하기 위하여 자장의 변화율을 변동시키면서 헬륨증발량을 측정 한 자료로부터 이 저장장치의 교류손실을 구한 실측치와 (6)과 (7)식을 이용하여 계산한 값과를 그림 3에서 보여주고 있다. 그림에서 보면 실측치와 계산치는 잘 부합되며 자장변화율이 클수록 두 값의 차이가 커지는 것은 저온용기의 와류손이 포함되지 않았기 때문이다.

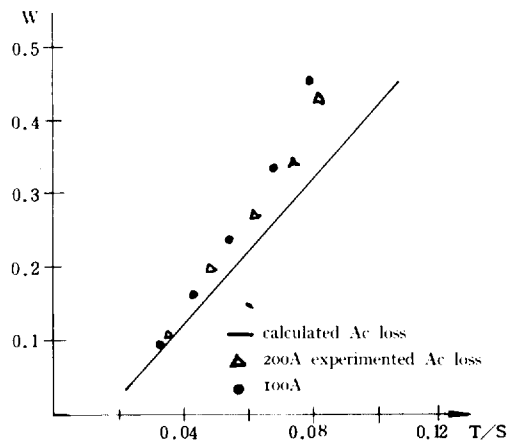


그림 3 25KJ 초전도코일의 교류손실
Fig. 3 Ac loss of 25KJ superconducting coil.

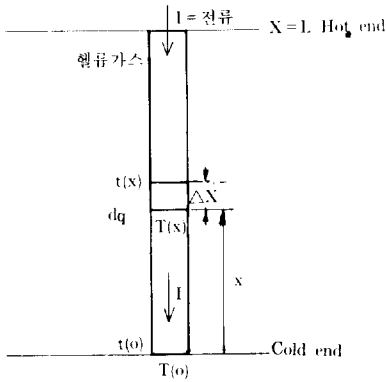


그림 4 전류도입선의 모델
Fig. 4 A model of current lead.

2.5 電流導入線 設計 및 製作

전류도입선은 외부로부터 전류를 供給하는 導線으로 溫度分布가 4k에서 300k의 상온까지 걸쳐 있으며 전류의 변화가 심하고 도체와 냉매사이의熱傳達係數, 전기도전율등이 온도에 따라 변하기 때문에 低温容器와 같이 熱해석이 간단하지 않다. 도입선은 熱源은 상부로부터 傳達되는 傳導率과 도선자체의 주울열에 의한 열이 있어 電流導入線은 재료, 모양, 기체헬륨통로등을 열침입 最小化 觀點에서 設計해야 한다. 즉 도입선단면적을 크게하면 전도율이 증가하고 주울열이 감소하는 반면 단면적을 작게하면 반대현상이 일어나므로 열침입이 최소가 되는 최적단면적과 모양이 있게 된다. 本研究에서는 그림 4와 같이 電流導入線의 전형적인 모델로 관련 방정식을 풀어 도입선의 단면적 A와 길이 L을 바꾸면서 헬륨증발량 m이 최소가 되는 조건을 구한다. 電流導入線을 지배하는 溫度방정식은

$$A \frac{d}{dx} \left(k(T) \frac{dT}{dx} \right) - hp(T-t) + \frac{\rho(T)I^2}{A} = 0 \quad (8)$$

이고 전류도입선 側面을 통하여 나간 열량은 전류도입선 주위의 기체헬륨온도를 상승시키므로 (9)식과 같이 표시된다.

$$hp(T-t) = m C_p \frac{dt}{dx} \quad (9)$$

이때 전류도입선 하단을 액체헬륨이 탕도록 設置하면 $T_{(0)}$, $t_{(0)}$ 는 액체헬륨 비등점(4.2k)과 같고 電流導入線 상단은 수분이 붙은 경우를 가정하여 273 k까지 가지게 되어(10)식과 같은 경계조건을 갖는다.

$$T_{(0)} = t_{(0)} = 4.2k, \quad T_L = T(x=L) = 273k \quad (10)$$

또 헬륨이 증발되면 소모되는 열량은 모두 전류도

입선 하단의 단면적을 통하는 전도열이라면 (11)식을 얻을 수 있다.

$$KA \frac{dT}{dx} (x=0) = m C_L \quad (11)$$

(10)과(11)식의 조건하에서 (8)과(9)식의 연립미분방정식을 Runge-Kutta 사용하여 풀면 단위시간당 증발량 m이 계산된다. 그림 5는 電流導入線 열해석은 위한 흐름도이며 이 해석결과로부터 導線길이 단면적, 및 모양을 決定한다. 사용전류 200A일때 도입선 길이에 따른 증발량의 변화는 그림 6와 같다. 여기서 보면 일정한 단면적에 도입선 길이가 길어지면 헬륨증발량이 감소하지만 120cm 일때 증발량을 100으로 보면 54%인 65cm에서 증발량은 108이다 그러나 길이가 늘어 났을때 저온용기 제조상의 어려움 가격등을 고려할때 10%이내의 헬륨소비량은 상쇄시킬 수 있다고 보아 導入線의 길이를 65cm로 決定하였다. 그림 7은 길이를 65cm로 決定한 후 최적단면적을 결정하기 위하여 단면적에 따른 증발량의 변화를 나타낸 것이다. 단면적이 0.181 cm² 일때 헬륨소비량이 최소임을 알수 있다. 헬륨소비량과 도입선간의 熱傳達係數가 도입선의 영향에 큰 영향을 받지 않는다고 하면 같은 단면적에서 도입선의 수변길이에 따라 헬륨소비량이 영향을 받게되어 변의 比率이 1:3인 직사각형 모양을 택하였다.

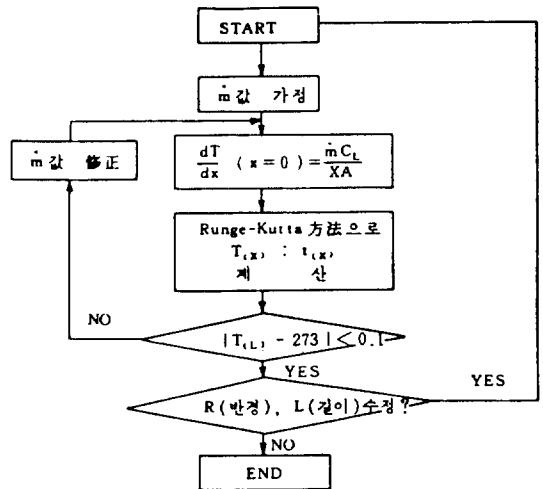


그림 5 전류도입선 열해석은 위한 흐름도
Fig. 5 Flow chart for thermal analysis of current lead.

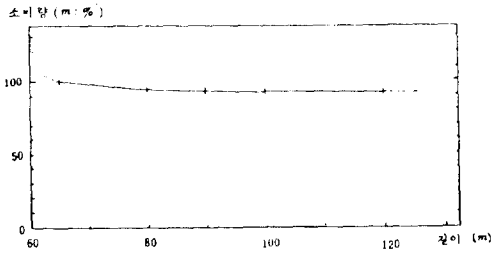


그림 6 도입선 길이에 따른 헬륨증발량의 변화
 Fig. 6 Helium evaporation dependence of a length of current lead.

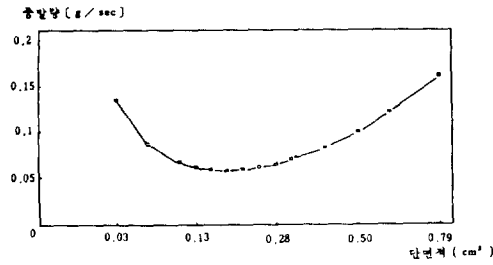


그림 7 단면적에 따른 헬륨증발량 변화
 Fig. 7 Helium evaporation dependence of a cross section of current lead.

2.6 低温容器的設計 및 製作

2.6.1 열침입계산과 열차폐 설계

低温容器는 초전도코일을 극저온으로 유지시켜

초전도상태가 되도록 하는 용기로 내부의 극저온 動作부분과 상온층과 연결된 인터페이스부를 갖고 있다. 저온용기의 설계는 용기를 구성하는 각부분에 대하여 외부로부터의 열침입 경로, 열침입량, 외력, 재료강도, 전류傳入線과 超電導코일등을 고려하여 열침입의 最小化와 초전도코일이 安定하게 極低溫이 유지되도록 設計하여야 한다. 열침입계산시에 저온용기에 이중 진공벽을 두어 대류에 의한 열침입은 제거되어 각경로에서 근사적으로 熱傳導量과 熱輻射量을 계산하면 된다. 액체헬륨용기의 열침입을 계산하면 열전도량과 열복사량은 각각 0.38w와 0.11w로 이때 열전도에 의한 침입량은 열복사에 의해 증발된 헬륨가스 溫度增加에 의해 充分히 보상되기 때문에 추가 액체헬륨 소비는 없다 따라서 복사에 의해서만 액체헬륨을 소비하게되며 이때 헬륨소비량은 0.15(l/h)이다. 액체질소 용기의 총열량은 20.42(w)로 액체질소 消費量으로 환산하면 0.45(l/h)가 된다. 저온용기 구조는 그림 8에서 보는바와 같이 진공단열을 위한 이중 탱크형으로 가장 안쪽탱크는 액체헬륨탱크로 초전도코일을 수용하고 헬륨탱크와 외부탱크 사이에 液體窒素자켓을 둔다. 液體窒素자켓은 저온용기 주위에서 輻射熱침입을 저감하고 내부에 있는 헬륨저장탱크벽을 통한 傳導熱 침입 및 헬륨탱크 상부공간을 통한 대류열 침입감소 역할을 한다. 헬륨탱크를 상온과 직접 노출을 피하기 위하여 질소자켓과 헬륨탱크를 Thermal anchor로 용접 연결한다. 액체헬륨탱크 상부

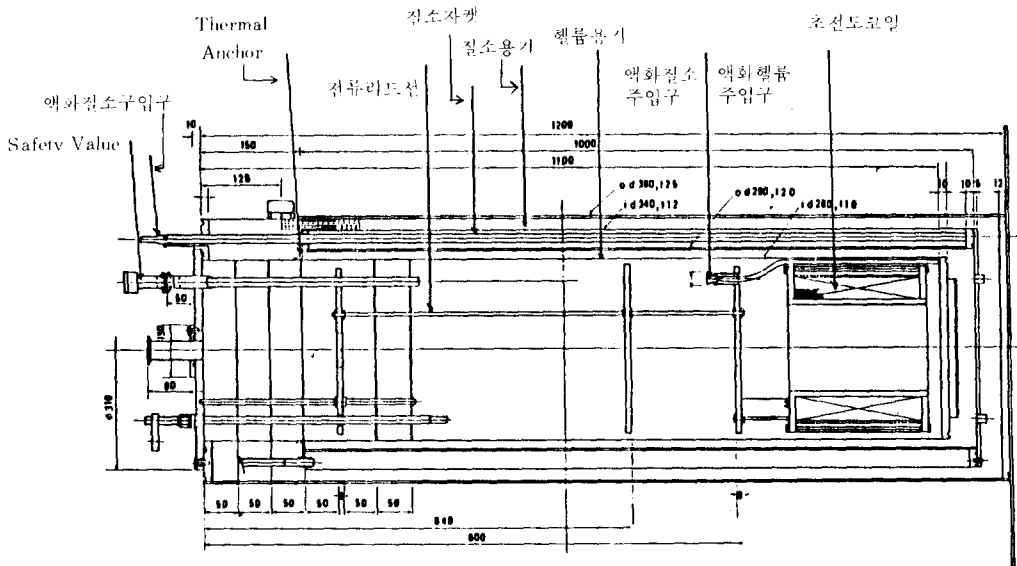


그림 8 저온용기의 구조
 Fig. 8 Configuration of a cryostat.

는 저온용기 뚜껑에 지지되는 열절연재(우레탄) 과 5개의 복사 차폐판을 두어 상부로 부터 傳導熱과 복사열 침입을 저감했다.

2.6.2 헬륨탱크의 製作

실린더형용기의 내부압력은 방사방향 스트레스와 軸方向스트레스로 나누어지며 두께는 가혹한 조건인 조건인 放射方向 스트레스에 의하여 결정된다. 이 식으로 부터 내부압력이 最大 25psi 일때 두께는 0.11(mm) 이상이어야 하며 제작상어려움과 안전율을 고려하여 1.0(mm)로 결정했다. 하판은 부록 1의 (2)식으로 계산하여 두께 2.91(mm) 이상으로 안전율을 고려하여 10(mm)로 결정하였다. 위의 설계조건을 이용 두께 1.0(mm) sus 304 스텐레스강 판으로 직경 260(mm) 길이 1100(mm) 실린더를 만들어 하부는 두께 10(mm) 스텐레스강을알곤용접하여 제작했으며 특히 하판에는 습기를 흡수 용기주위의 결빙현상을 방지하기 위하여 Charcoal을 부착하였다.

2.6.3 질소자켓의 設計와 제작

容器두께의 결정은 액체헬륨용기와 비슷하나 이 용기는 대기온도와 진공으로 차단되어 있어 열전달에 의한 열침입은 거의 없다. 그러나 서멀앵커와의 지지강도를 고려하여 내벽두께는 2.0mm, 외벽은 1.2(mm)로 하였다 하판은 판 내, 외부가진공으로 壓力차는없으나 제작 편의상 5(mm)로 하였고 재질은 액체질소온도(77k)가 판 전체에 잘 전달되도록 熱傳達率이 좋은 구리를 사용하였다. 설계에서 검토된 바와 같이 두께 2 (mm), 직경29(cm) 길이 100(cm)의 sus304 스텐레스강 실린더와두께 1.2 (mm), 직경34(cm), 길이100(cm)의 실린더를 同心軸으로 겹친다음 두께 100(mm)의 sus 304링을 실린더 上·下部에 끼워넣어 용접하고 하부에는 다시 두께 5(mm), 직경 34(cm) 구리판을 하부링 나사로 조인다 이 자켓을 액체헬륨통에 끼우고 상부링 3개의 구멍에 판이 밖으로 유출되도록하여 용접한다. 이 판은 액체질소 出入口 1개 가스出入口로 2개가 쓰이며 액체질소 출입구 파이프는 밑면까지 내려가 있다.

2.6.4 眞空容器와 뚜껑(flange) 設計 및 製作

眞空容器는 진공斷熱法을 채용하므로 벽의 두께는 외부의 열침입과 무관하지만 超電導코일 및 상부뚜껑하중을 고려하여 2.5(mm)로 취하였다. 하판의 두께도 외부·내부압력차에 의한 저온용기 무

게(50kg)를 받음으로 안전율을 고려하여 12(mm)로 하였다. 이의 제작은 길이 120(cm)의 sus 304 스텐레스강 실린더를 하부두께 12(mm) 직경 38cm의 원판에 용접하고 이것을 液體窒素자켓에 의뢰 상부를 액체헬륨탱크 상부링에 용접하여 만든다. 이 탱크위에 Cryolab제 Cutoff 밸브를 設置하여 眞空을 하기위한 공기 배출구와 비상시안전밸브 역할을 하도록하였다. 진공탱크사이에 복사열을 감소시키기 위하여 알루미늄을 증착한 폴리에스테일쉬트 10매를 積層하여 插入하였다. 저온용기 뚜껑은 超電導코일을 지지하기 때문에 두께 10(mm)직경 31(cm)sus304 스텐레스강으로 하였고 여기에는 電流導入線 2개 멀티핀 소켓 2개 열전대용 소켓 1개 안전변과 파열판포트 1개 액체헬륨 주입구 1개 헬륨가스 출구 1개 예비포트 2개를 설치하였으 中央에는 시료주입용 포트가 있다.

3. 測定 및 保護裝置 設計

3.1 센서의 부착설계

초전도에너지저장장치의 운전상태 安定性여부를 판단하기 위하여 액체헬륨액면測定, 溫度測定 및 磁場측정을 위한 센서를 초전도 코일製作時 설치하여야한다. 액체헬륨 액면 측정온도에 따른 저항변화폭이 큰 저항형 센서인초전도線林 Nb Ti를 사용하였고, 온도측정 센서로는 高精密度의 온도 測定을 고려하여 AuFe/cr를 磁束密度가 가장높은 초전도코일 中央부분 3군데를 설치하였다. 또한 자속측정은 RHY17 홀소자를 초전도코일 중심에서 2(cm) 낮은 곳에 설치되었기 때문에 홀소자 중심은 코일 내측 중앙에서 8 (mm)의 거리에 있어 이 점의 자장은 계산치로 부터 B=1.1B₀ 값을 가지게된다.

3.2 保護裝置의 設計

초전도저장 저장장치 시스템에서 흔히 일어나는 문제점은 超電導코일 내에서 부분적으로 常電導化하는 現象이다. 이러초전도체내의 常導體 영역(normal zone)은 로렌즈힘과 권선구조의 상호작용에 의한 機械的인 외란이 重要한 원인이 된다. 보통 저장장치는 常導體영역이 초전도 상태로 회복되도록 설계되어야 하지만 만약 회복이 불가능해지면 高電流密度에 의한 주열이 발생 코일 전체로 파급되는 靚치가 발생되어 코일 소손을 가져온다 따라서 常導體 이전으로 코일자체가 초전도상태로의 회복능력을 상실하면 이 靚치를 검출하여 전원으로부터

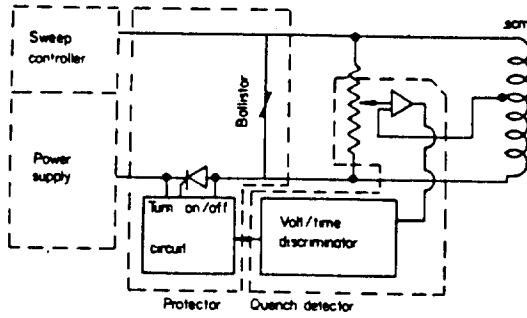


그림 9 초전도 저장장치의 보호시스템
 Fig. 9 Schematic block diagram of SMES protection system.

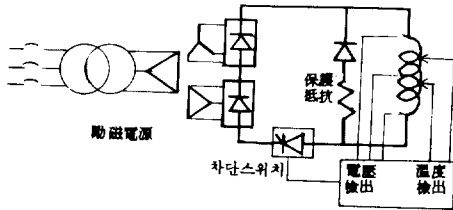


그림 10 초전도 코일특성 시험회로
 Fig. 10 Circuit for characteristics test of superconducting coil.

전원은 유도전압조정기와 정류기로 이루어지고 출력전압의 리플을 줄이기 위하여 6상 전파정류를 하였다. 냉각에 소요되는 액체질소는 100(l)의 듀어(Dewar)로 공급하고 액체헬륨은 생산능력이 6(l/h)인 액체헬륨발생기로 부터 공급된다. 기화된 액체헬륨은 가스백과 회수용압축기를 통하여 다시 냉각시스템으로 들어오게 된다. 그림11은 실험장치 전경을 나타낸 것으로 그 주위에 전원 및 냉각시스템이 있는데 우측으로 부터 액체질소 듀어 헬륨듀어, 보호장치, 여자전원이다.

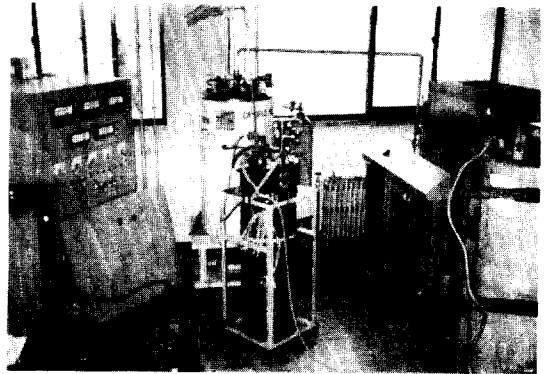


그림 11 실험장치 전경
 Fig. 11 Overview of experimental equipments.

코일을 분리시킴과 동시에 코일에 貯藏된 에너지를 効果的으로 放出시키는 保護裝置가 필요하게 된다. 本 研究에서는 靚지檢出方法으로 그림 9에 보는바와 같이 초전도코일 中間단자를 외부저항과 브릿지 회로를 구성하여 초전도코일의 한 부분에서 온도증가에 따른 저항변화로 전위차인 靚지신호를 轉流回路로 보내 보호장치를 動作시킴으로서 전원으로부터 超電導코일을 분리시킴과 동시에 1[Ω]의 保護低抗(Dump resistor) 의하여 초전도 코일에 저장된 에너지를 방출시켜 코일을 보호하게 된다. 이때 전류회로에 使用된 콘덴서의 規格은 2(mF), 450[V]이고 보호저항은 1[Ω], 10(km) 용량을 사용하였다.

4. 特性試驗 및 老察

4.1 試驗回路

製作된 초전도코일을 低温容器에 넣어 조립하여 여기에 여자전원과 보호회로를 연결하여 액체질소와 액체헬륨을 供給하기위한 제반장치를 가동시킨다. 전체 시험회로는 그림10과 같다. 여기서 여자

4.2 冷却에 따른 溫度 대 코일低抗特性

초전도코일 냉각은 우선 액체질소를 헬륨용기내에 충전하여 코일을 액체질소온도인 77°k로 예냉한다. 코일의 직류저항값으로 코일이 냉각된 것을 확인한 다음 열차폐 질소자켓에 액체질소를 주입한다. 그 다음 질소가스로 저온용기내의 액체질소를 추출하고 헬륨가스로 질소 가스를 치환한 후 액체헬륨을 트랜스 튜브를 사용하여 저온용기 밑부분으로부터 액체헬륨을 주입하여 코일을 냉각한다. 위의 순서에 따라 냉각 대 코일저항 변화의 실험을 행한 결과는 다음과 같다 먼저 액체헬륨통에 액체질소를 코일이 잠길정도로 주입하여 12분이 지난후 상온에서 100[Ω]이던 코일低抗이 77°(K)에서 1[Ω]으로 되고 3시간후 열차폐 자켓에 액체질소를 채우고 액체헬륨통내있던 액체질소를 약60분에 걸쳐 전부 추출할때 코일의 溫度가 약간 상승하여 저항치가 약 9[Ω]증가 하였다. 곧이어 액체헬륨을 주입하였는데 코일저항은 약30분후 0[Ω]으로 떨어졌다. 그림12는 冷却에 따른 저항강하특성을 기록계로 기록한 것을 정리하여 나타냈다.

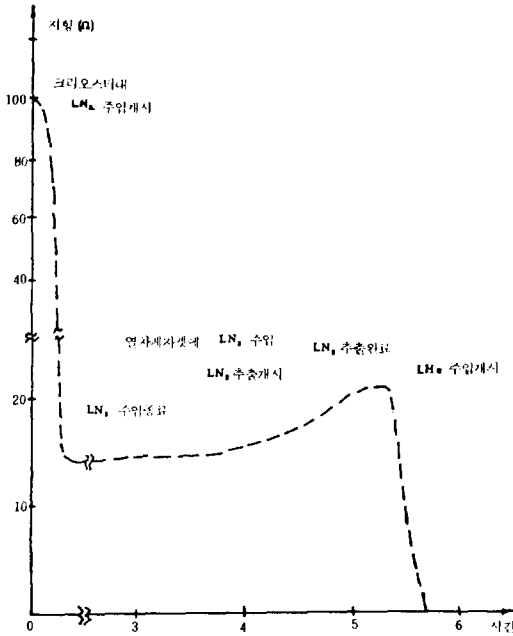


그림 12 초전도 코일냉각에 따른 코일저항 변화
Fig. 12 Cooling of 25KJ superconducting coil.

4.3 電流 대 磁場特性

초전도코일이 充分히 냉각된후 코일전류를 서서히 증가시키면서 코일내 자장을 홀소자를 이용 측정하였으며 電流와 磁場은 거의 直線的으로 변화된다. 홀소자로 測定한 자속밀도는 動作電流 200[A]에서 3.4[T]로 설계치 ($B \approx B_0 \cdot I \cdot 1 = 1.3 \approx 3.6(T)$) 3.6[T]의 약 6%의 오차가 발생하였다. 또한 最大磁束密度를 구하면 3.52[T]로 계산되며 최대자속밀도에 대한 負荷曲線을 보면 전류마진이 약 4%로 設計置와 잘 부합하였다.

4.4 電流導入線의 熱침입 特性

전류도입선의 常導體로 전류가 흐르면 주울열이 발생하고 常溫에 노출되어 있는 부분이 있기 때문에 傳導熱이 발생헬륨증발의 원인이 된다. 전류가 각각 0, 100, 150, 200[A]일때 액체헬륨소비량을 측정한 결과 각각 1.64, 1.73, 1.81, 1.92[l/h]가 얻어졌고 이 結果를 토대로 그래프를 나타내면 그림13과 같으며 여기서 전류도입선의 전류와액체헬륨 증발량의 관계식은 $Q = \alpha + \beta I^2$ 과 같이되며 여기서 $\alpha = 1.64$, $\beta = 0.7 \times 10^{-5}$ 값을 가진다.

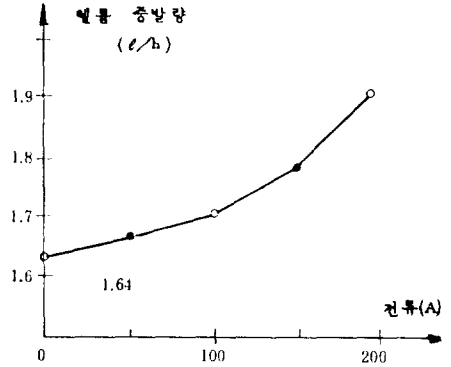


그림 13 전류도입선이 전류에 따른 헬륨증발량
Fig. 13 Helium evaporation dependence of current lead current

4.5 에너지 貯藏效率

초전도코일에 에너지를 저장할때 入力電力은 (12)식과 같다.

$$P = I \cdot L \frac{dI}{dt} + R_s \cdot I^2 + n \cdot E_a \cdot I \tag{12}$$

그식의 파라메타의 설명은 부록에 있다. (12)식의 제 1 항은 코일에 저장되는에너지 2 항은 配線및 전류도입선의 손실 제 3 항은 다이오드 손실이다. 코일의 전류가 I_0 일때 코일에 저장된 에너지 E는

$$E = \frac{1}{2} L I_0^2$$

이 되고 코일의 전류를 τ 초동안 0 에서 I_0 까지 증가시킬 경우 저장효율 η_{in} 은

$$\eta_{in} = \frac{\frac{1}{2} L I_0^2}{\int_0^{\tau} P dt} \tag{13}$$

가 된다. 본연구에서 사용된 전원은 2 개의 전과정류회로가 직렬로 연결되어 있고 또 비상회로차단다이오드가 직렬로 되어있어 $n=5$ 이고 $E_a=0.7[V]$ 인 소자를 선택하였다. 최고전류를 200[A]로 하고 전류증가율을 5.10 및 20[A/S]로 한 경우 저장효율은 각각 46.7, 62.5, 76.9 [%] 이었다. 이결과를 보면 電流增加율을 높일수록 효율이 상승함을 알수 있다. 그 이유는 식에서 알수 있듯이 전류증가율이 큰값이어야 코일단자에 걸리는 전압이 다이오드 및 回路 직렬저항의 전압강하보다 월등히 높도록 設計해야 함을 알수 있다.

4.6 권치 特性 試驗

권치에 대한 자체吸收능력과 보호회로 動作를 檢

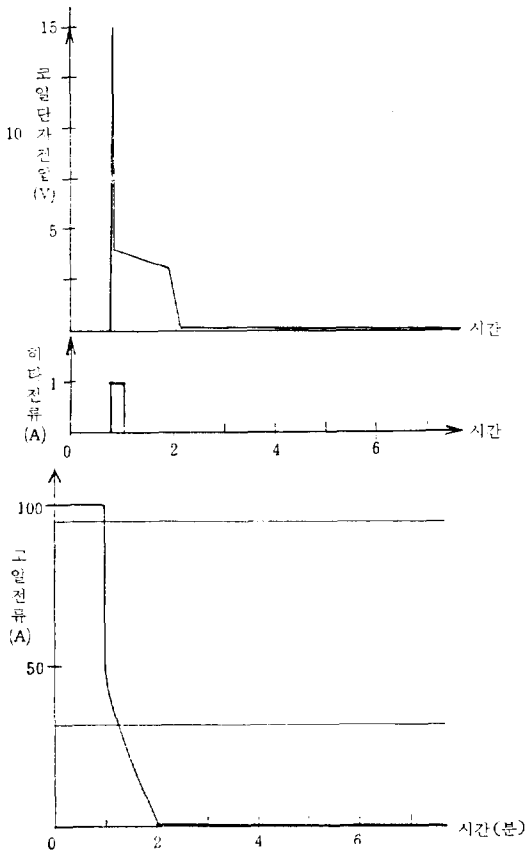


그림 14 퀘치특성 시험
Fig. 14 Characteristics test of quench.

증하기 위하여 초전도코일에 퀘치 발생용 히터를
設置하였다. 퀘치 시험은 그림14에서와 같이 약30초
간 1[A] 전류를 通電한 결과 코일내에 퀘치가 발생
하여 코일전압이 순간적으로 15[V] 상승하였고 코
일전류가 100[A]에서 50[A]로 減少하였다. 퀘치가
발생후 즉시 히터전류가 차단되었고 동시에 여자
전원이 코일보호 장치에 의하여 차단되었다. 시스
템냉각 능력이 充分하여 초전도코일은 초전도상태
로 復元되었고 저장된 에너지는 방전회로를 통하여
방출되었다. 본 실험에서는 퀘치 발생시 回復能力
과 보호회로의 동작성능을 확인하였으나 퀘치가 일
어나는 메카니즘 회복되는 특성에 대한 정량적인구
를 수행해야 할 것이다.

5. 結 論

2500J 超電導에너지貯藏裝置를 設計, 製作 및 그

特性試驗을 通하여 얻은 結果는 다음과 같다.

- (1) 試驗 結果 2500[J] 에너지를 200[A] 定格電流
에서 安定하게 貯藏되었다.
 - (2) 초전도에너지저장 장치에서 필수적인 超電導
코일 電流導入線 저온용기, 測定및 保護裝置의 設
計方法과 製作技術을 확립하였다.
 - (3) 電流 대 磁界特性 溫度 대 低抗특성 電流導入
線の 열침입특성 및 교류특성시험을 통하여 設計置
와 시험치가 잘 부합됨을 확인하였다.
 - (4) 특히 퀘치특성試驗을 통하여 외란에 의한 저장
장치 열적 安定성과 保護裝置성능을 확인하였다.
- 앞으로 퀘치전달과 회복특성의 정량적해석 및 교
류손실 분석을 프로그램화 하면 소형 및 中形 SM-
ES 設計에 유용한 자료로 활용될 것으로 確信한다.
(본 연구는 韓國電力연구원 연구원지원으로 수행되
었음.)

참 고 문 헌

- 1) R.W. Boom, et al., "Wisconsin Superconductive Energy Storage Project", Volume IV, Univ. of Wisconsin at Madison, 1976-1981.
- 2) R.W. Boom and H.A. Peterson, "Superconductive Energy Storage for Power Systems," IEEE Trans. Magnetics, vol. MAG-8, no. 3, pp 701 1972.
- 3) R.J. Loyd, et al., "Conceptual Design and Cost of superconducting Magnetic Energy Storage Plant," EPRI Report, EM-3457, April, 1984.
- 4) K. Yasukochi, "Superconducting Magnet Development in Japan," IEEE Trans. vol. MAG-19, no. 3, pp179-188, 1983.
- 5) R.F. Bischke, "Electric Utility Load Leveling By SMES", proc. of the U.S.-Japan Workshop on SMES, oct. 19-23 pp 56-63, 1981.
- 6) Y. Osawa & M. Haya shi, "Stabilizing Control for Power System by Means of SMES", proc. of the U.S.-Japan Workshop on SMES, Oct. 19-23 pp 79-88, 1981.
- 7) M. Wilson, "Superconducting Magnet", Clarendon Press Oxford, 1983.
- 8) H. Brechna, "Superconducting Magnet Systems", Springer-Verlag, 1973.
- 9) 한 송엽, et al., "3 Tesla 초전도 전자석 설계 및 시작", 전기학회논문지, 35권 1호, pp 36-43, 1986.
- 10) W.V. Hassenzahl, "Will Superconducting Magnetic Energy Storage Be Used On Electric Uti-

lity System?", IEEE Trans. vol. Mag-11, no. 2, pp 482-488, 1975.

D : 복합도체의 직경
l_r : 트위스트 직경
L : 복합도체의 전장

부록

I.

(6) 식 파라메타

λ : filling factor
V : 복합도체의 체적
b : 필라멘트의 직경
v : 주파수
J₀, H₀ : 재료 상수
H_{max} : 최대자계

(7) 식 파라메타

ρ_c : ρ_{mat} $\frac{w}{w-d}$
ρ_{mat} : 상도체 저항율
d : 필라멘트 직경
W : 필라멘트간의 거리

II. 전류도입선 관련방정식 파라메타

k(T) : 구리의 열전도도 (10[w/w·k])
ρ(T) : 구리의 고유저항
A : 전류도입선의 단면적
h : 구리와 헬륨사이의 열전달계수 (0.023 [J/sec·cm²·k])
I : 전류
P : Perimeter (= 2πR)
C_l : 액체헬륨의 기화열 (23 [J/g])
m : 단위시간당의 헬륨증발량
C_v : 기체 헬륨의 비열 (5.2 [J/g·k])
T : 도체 온도
t : 헬륨가스 온도