

0.5MJ 안정화용 초전도 에너지 저장장치 개발

장종근*, 이운희*, 남궁도*, 최인혁*
*한국전력공사 기술연구원

황석영**, 이기식**
**단국대학교

A Development of 0.5MJ Stabilizing SMES (Superconducting Magnetic Energy Storage)

JANG Jong Kun*, LEE Oon Hee*, NAMGOONG Do*
CHOI In Hyuk*
*KEPCO Research Center

HWANG Suk Young**, LEE GI Sik**
**DANKOOK University

Abstract - We have developed a stabilizing SMES with 0.5MJ energy storage capacity through all the research process of the system planning, magnet drawing which includes various kinds of evaluation for the optimized system organization. This research performance is considered to be very distinguished one. Besides, the acquired knowledge and many experiences getting through the performance of the study are much beneficial to other studies concerning with a development of superconducting electrical power machines. This paper gives the general presentation of the study and many kindes of experimental results including analysis of them.

I. 서 론

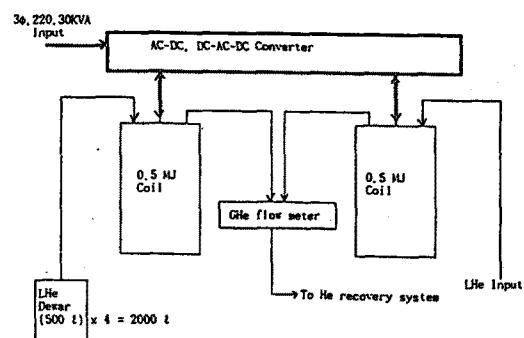
경제성장으로 인한 산업발전은 에너지 중에서도 특히 가장 안전하고 이용하기 쉬운 전력에너지의급격한 수요증가를 이루었을뿐만 아니라 부하 Pattern의 다양화와 양질의 전력공급에 대한 요구로, 전력기기의 고성능, 고효율화를 원하는적인 과제로 대두되었다. 또한 지구환경 보존을 위한 각종 협약들은 종래의 화석연료 사용기기들에 대하여 많은 제약을 가하고 있음뿐만 아니라 이러한 경향은 앞으로도 더욱더 심해될 것으로 생각되어진다. 따라서 환경공해를 수반하는 전력산업은 일자리 및 환보에서도 그 어려움이 배가될 것으로 예상된다. 이러한 차원에서 신진 외국에서는 이를 극복하기 위한 수단으로 21세기 천연산으로 으로 어려지고 있는 초전도 기술을 이용하여 전력기기의 초전도화를 이룩하고 이를 통하여 고효율의 전력제공을 구축하려는 연구들을 활발히 전개시켜 왔으며 이제 그 실현이 목전에 있는 것으로 알려지고 있다. 특히 초전도 전력기기 중에서도 안정화용 에너지 저장장치는 규모 및 경제적인 측면에서 실용화 시기가 상당히 빠를 것으로 예상되고 있으며 이미 일부 선진국(미국, 캐나다 등)에서는 실용화급 규모를 개발하여 사용중인 것으로 발표되고 있다. 이러한 현실을 감안함에 국내의 안정화용 초전도 에너지저장장치의 개발을 위한 연구가 상당히 뒤늦은감은 있으나 (1984년 25kJ 안정화용 SMES개발로 시작되었음) 그 짧은 연구기간을 통하여 많은 진전을 이루어 이제 0.5MJ 안정화용

SMES의 자체개발 ('94년 7월) 수준에 도달하였다. 물론 실용화 규모급의 기기를 개발하기 위해서는 아직도 많은 연구가 있어야겠지만, 급변 연구를 통하여 얻어진 안정화용 SMES개발 경험 및 축적된 기술은 국내 초전도 전력기기 개발에 많은 참고가 될수 있으리라 생각한다.

II. 0.5MJ 안정화용 SMES의 전체 시스템 구성 및 설계, 제작, 시험

1. 전체 시스템 구성

초전도 SMES 시스템은 크게 초전도 마그네트와, 마그네트를 수용하는 구조은 보존용기, 마그네트의 전류 Lead선을 인출하는 전류도입선, 각종 실험정보를 취득하기 위한 센서등 계측장치 및 마그네트에 저장된 에너지를 충방전시키기 위한 전력변환기 등 크게 다섯 부분으로 나눌수 있다. 그 중에서도 특히 전력변환기의 경우는 SMES를 계통에 직접 연결하여 충방전 시험을 하기위한 선형 연구가 부재한 관계로 설계통연계를 하지 않고도 충방전 시험이 가능한 WISCONSIN BRIDGE(DC - AC - DC Converter)를 적용하였다. 또한 웨스콘신 브릿지를 통하여 충방전 시험을 하는 경우 계통과 분리된 상태에서 수행되므로, 저장된 에너지를 방진할때 이를 흡수 저작할수 있는 장치가 있어야 하며 이를 위해 추가적으로 초전도 마그네트가 필요하게 된다. 따라서 본 연구에서는 초전도 마그네트 2대를 사용하는 시스템으로 구성하였다. 다음의 그림은 본 연구를 통해 구성된 0.5MJ SMES장치의 개별적인 전체 구성도를 표시하고 있다.



2. 마그네트 코일용 초전도선재

일반적으로 초전도 선재는 규격 가는 초전도 Filament가 안정화재에 조밀하게 박혀 있으며, 필라멘트들도 서로 엮어져 구성되므로 대단히 복잡한 형태를 갖게 된다. 다음 표와 그림은 본 연구에 사용된 초전도 선재의 사양과 형상을 표시한다. 아래에서 보는 바와 같이 초전도 재료로는 NbTi가 사용되었고 안정화재로는 구리가 사용되었으며 선재의 기계적인 힘을 보강하기 위한 보강재로는 스텐레스틸이 사용되었다.

표 2.1 사용된 초전도 선재 사양

Sc material	NbTi	NbTi
NbTi : Cu	1 : 1.5	1 : 1.5
No. of Sc Wires	9 (개)	6 + 6 (개)
No. of St. St Wires	9 (개)	12 + 6 (개)
No. of filaments	8910	8910
Filament diameter	6 (μm)	6 (μm)
Twist pitch	10 (mm)	10 (mm)
Insulation	Epoxidized glass fiber	Epoxidized glass fiber
Effective matrix resistivity	10^{-8} (Ωm)	10^{-8} (Ωm)

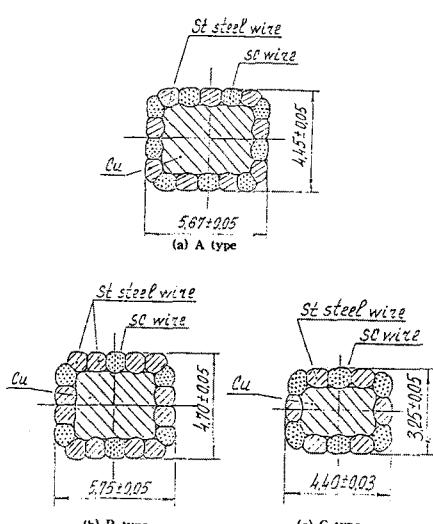


그림 2.1 사용 선재의 구조 형상

3. 초전도 마그네트 설계

가. 초전도 마그네트의 설계 방법

초전도 차장은 코일내부의 불규칙한 특성때문에 차장과 전류밀도의 계산을 어렵다. 또한 대전류가 흐르는 전류기기인으로 고차장에 의한 응력이 대단히 크다. 따라서 차장의 분포와 전류밀도의 관계를 고려하여 초전도 마그네트의 형상을 결정할 필요가 있다. 일정한 에너지 저장율량을 갖는 초전도 마그네트를 설계하는 기준의 방식은 주어진 코일 내경에 대해 적당한 형상계수 α (코일의 내경에 대한 외경의 비), β (코일의 내경에 대한 깊이의 비)를 가정하여 전류를 변화시키는 Trial and Error Method방식으로 이루어져 왔으나, 본 연구의 초전도 마그네트의 설계는 초전도 선재의 위계특성을 반영하고, 주어진 에너지 저장율량을 가지면서 선재량을 최소화 할수 있는 알고리즘을 개발 적용하였으며 다음은 그 알고리즘의 Flow Chart이다.

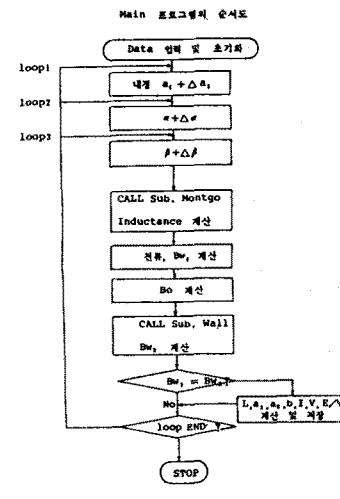
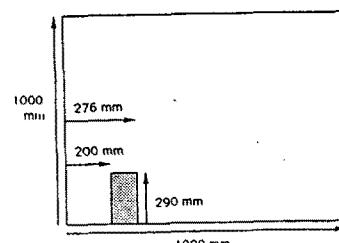


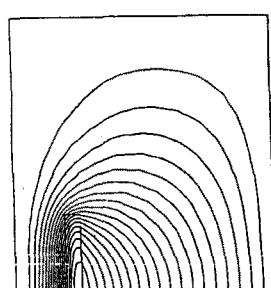
그림 2.2 순서도

나. 초전도 마그네트의 차장해석

초전도 마그네트의 설계에 있어서 차장의 분포 및 크기는 초전도 입체조건 및 에너지 저장율량과 직결되는 것이기 때문에 가장 핵심적이고 필수적인 사항이다. 그러나 초전도 선재가 복합적으로 구성되어 있을 뿐만 아니라 용량이 큰 마그네트일 경우 그 변수가 대단히 많고 각 턴이 기계적으로 서로 다른 위치에 배열되므로 코일내의 차장의 크기 및 분포를 해석하는 것이 그렇게 쉽지 않다. 일반적으로 차장을 구하는 방법은 수치해석적 방법과 유한요소법(Pinite Element Method)이 있으나 본 연구에서는 유한 요소법에 의하여 차장의 분포를 계산하였으며, 다음 그림은 여기에 사용된 해석 모델과 그 결과를 표시한 것이다.



유한요소법 해석을 위한 코일 단면



코일 1의 차속선 분포

다. 마그네트의 인덕턴스 계산

마그네트 코일의 인덕턴스는 다음과 같은 자기에너지 관계식으로부터 구할 수 있으며, 이를 위한 고밀도의 자속밀도는 전술한 유한요소법의 차장해석에 의하여 구하였다.

$$\frac{1}{2} LI^2 = \int_t \frac{B^2}{2\mu_0} dt$$

I : 코일에 인가한 전류 [Ampere]

B : 발생 자기 [Tesla]

μ_0 : 푸아송 ($= 4\pi \times 10^{-7}$)

$$L = \frac{2}{I^2} \int_t \frac{B^2}{2\mu_0} dt$$

$$J = \frac{NI}{S}$$

J : 코일의 전류밀도

S : 코일 단면적

N : 코일의 Turn 수

I : 코일의 전류

관계식을 이용하여 코일 1, 코일 2에 대한 전류밀도를 구하면 다음과 같다.

코일 1(14층) : 4.606×10^7 [A/m²] ($= 1310 \times 1550 / 0.58 \times 0.026$)

코일 2(12층) : 내층(6층) : 4.425×10^7 [A/m²]

($= 558 \times 1550 / 0.58 \times 0.0337$)

외층(6층) : 8.208×10^7 [A/m²]

($= 758 \times 1550 / 0.58 \times 0.0233$)

코일 1, 코일 2에 대한 인덕턴스를 구하면 다음과 같다.

코일 1 : 0.410 [henry]

코일 2 : 0.422 [henry]

또한 제작된 SMDS의 실측한 인덕턴스는 다음과 같으며, 설계치와 거의 동일함을 알 수 있다.

* 실측치 : 코일 1 : 0.420 [henry]

코일 2 : 0.432 [henry]

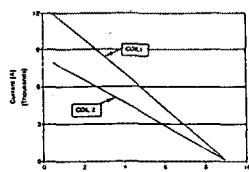
라. 마그네트의 에너지 저장용량

초전도체의 세가지 임계조건(전류, 자기, 온도) 중 어느 한 가지 조건이라도 만족되지 못하면 초전도 현상은 파괴되므로, 마그네트 코일의 에너지 저장용량을 결정하기 위해서는 무엇보다도 이를 조건이 만족되는 전류, 자기영역을 구하는 것이라 할 수 있다. 본 연구에 사용된 코일은 Solenoid Type으로써 차제해석 결과 코일내부 중앙부분이 가장 큰 것으로 나타났으며, 전류의 크기가 1550[A] 일때 자기의 값은 다음과 같다.

코일 1 : 3.178 [T]

코일 2 : 3.434 [T]

또한 #1, #2코일에 사용된 초전도 선재의 “임계자기 ~ 임계전류” 특성곡선은 다음과 같이며 이를 수식으로 표시하면,



코일 1 : $I_c = -1390.58c + 12631.5$

코일 2 : $I_c = -927.08c + 8421.0$

으로써 마그네트의 운전은 이들 임계영역 이하에서 이루어져야 하므로, 이를 만족하는 최대 운전점(교점)을 구하면 마그네트의 부하선(“전류 - 자속”의 관계곡선)과 임계특성곡선과의 교점을 찾아야 한다. 코일 1, 2에 대한 부하선의 표현식은 다음과 같다.

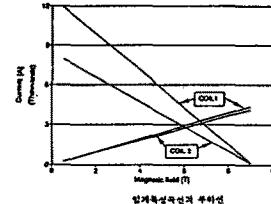
코일 1의 부하선 : $I/B_{max} = 487.72$ [A/T]

코일 2의 부하선 : $I/B_{max} = 451.37$ [A/T]

다음 그림은 코일 1, 2에 대한 최대 운전점인 임계특성곡선과 부하선의 교점을 표시하고 있다. 그림에서 보듯이 코일 1의 경우 임계특성곡선과 부하선 교점의 전류값은 3280[A]이고, 자기값은 6.72[T]이므로, 실제 운전전류 1550[A]에 대하여 1730[A]의 전류 여유율을 가지며, 나란가지로, 코일 2의 경우에는 2758[A], 6.11[T]이므로, 1208[A]의 전류여유율을 가지게된다. 교점의 전류값은 이론상의 최대전류이므로 실제로는 코일이 젠치 발생없이 안정하게 동작하기 위해서는 최대전류보다 여유를 둔 전류치를 최대 사용전류 즉 정격전류로 취한다. 두코일의 전류 margin은 이론상의 최대전류에 대한 전류 여유분의 비율로써 표시하면 각각 다음과 같다.

코일 1 : $1730/3280 \times 100 = 52.74\%$

코일 2 : $1208/2758 \times 100 = 43.80\%$



이상에서 본 전류 Margin은 냉매인 액체헬륨의 온도가 정상인 (4.2K)에서 구한 것이다. 코일에 대해 있는 냉매의 온도는 선재의 순질에 의해 1~2K정도 높을수 있으므로 이를 고려하여 6.2K에서 전류 margin을 구하면 다음과 같다.

코일 1 : 33.56[%]

코일 2 : 22.50[%]

코일 1의 선재는 소선을 9개 가지고, 코일 2는 6개 가지고, 동일 거장용량(9.5MJ)에 대하여 1.49 배($= 33.56/22.50$) 많다. 코일 2의 전류 margin은 22.50[%]로서 일반적으로 적용하는 margin에 적용하다고 보면 코일 1의 것은 과언이므로 코일 2의 것과 동일한 마진을 적용하면 코일 1과 코일 2의 에너지 저장용량은 다음과 같다.

코일 1 : 0.67 [MJ] ($= LI_c^2/2$)

코일 2 : 0.5 [MJ]

마. 초전도 마그네트의 교류손실

본 마그네트에 적용한 교류손실식은 동작 주파수 f 가 $f < f_{cr}$ 인 점에서 low frequency region이고, 자장의 세기 H_0 는 $H_0 > H_p$ 인 점에서 full penetration 이므로 Hysteresis, Eddy current loss 식은 각각 다음과 같다.

$$Ph/v =$$

$$\left(\frac{8}{3\pi} \lambda \cdot f \cdot j_c \cdot d \cdot H_0 + \frac{\pi}{80} \cdot j_c c_2 \cdot d_2 \cdot \lambda \right) \times 10^{-8}$$

$$P_{e/v} =$$

$$\frac{\pi^2}{4} \cdot \sigma_\perp \cdot H_0^2 \cdot d^2 \cdot f^2 \cdot \left[\frac{1}{2} + 2 \cdot \left(\frac{L_p}{\pi \cdot d} \right)^2 \right] \\ 10^{-16} [\text{W/cm}^3]$$

$$P_{t/v} = P_{h/v} + P_{e/v}, \text{ 여기서}$$

$$f_{cl} = \frac{1}{\sigma_\perp \cdot L_p} \times 10^9 = 100.0 [\text{Hz}]$$

$$H_p = 4 \cdot \lambda \cdot j_c \cdot d \quad [\text{Oe}]$$

$$f : 0.25 \sim 1.0 [\text{Hz}]$$

$$H_0 : 1400 \sim 3500 [\text{Oe}]$$

그리고 식에 있는 j_c 와 H_0 의 같은 선재 일부에 사용하는 차장 B 를 세서 초전도 선재의 $B-J$ 특성 곡선에서 알 수 있다. 또한 구해진 순실(에스테리시스 순실 + 결합순실)에 의한 액체 헬륨의 중방향은 다음과 같은 식으로서 계산 할 수 있다.

$$Q = \frac{P_t}{CL \cdot \gamma} \quad [\text{L/cycle}]$$

$$P_t : \text{총 교류순실 } [\text{J/cycle}]$$

$$CL \cdot \gamma = 2612.5 [\text{J/l}]$$

$$CL = 2.09 \times 10^4 [\text{J/kg}]$$

$$\gamma = 1.25 \times 10^{-3} [\text{kg/l}]$$

4. 초전도 마그네트의 용역

초전도 마그네트의 선재는 동작점에서 전류밀도가 높고 고자장이기 때문에 큰 기계적 스트레스를 받으며 이로 인한 초전도 선재의 동요는 웨인저상(국부적인 초전도 파괴현상)을 유발할 수 있다. 예나마, 일반적으로 고성능 초전도 마그네트의 경우 임계온도와 동작온도의 차이가 적고 4.2K정도의 극저온에서 마그네트의 열용량이 매우 적기 때문이다. 따라서 코일 편선시 초기 인장력은 운전시 편선의 음직임을 억제할 수 있어야 하며, 동시에 선재의 내부응력 허용치 이하여야 한다. 슬레노이드형 코일의 선재는 부하시에 다음과 같은 전자력 f 를 받는다.

$$\vec{f} = \vec{j} \times \vec{B} \\ = Jo\vec{\theta} \times (Br \vec{r} \times Bz \vec{z}) \\ = JoBr_z \vec{z} + JoB_z \vec{z}$$

임의의 N 층이 받는 반경 방향의 힘과 축방향의 힘은 다음 식과 같다.

$$F_{RN} = \left[\sum_{i=1}^{N_0} B_{zi} \cdot I + \sum_{i=N+1}^{N_0} B_{zi} \cdot I \right] - \left[\sum_{i=N+1}^{N_0} \frac{F_{L_i}}{R_i} + \right.$$

$$\left. \sum_{i=N+1}^{N_0} \frac{F_{L_i}}{R_i} \right]$$

$$F_{ZN} = \sum_{i=1}^{N_0} B_{zi} \cdot I$$

식에서 알 수 있듯이 슬레노이드 코일의 전자력은 축방향과 반경방향으로 작용하게 되지만 축방향의 전자력은 초기 인장력

설정과는 무관하며, 반경방향의 전자력만이 영향을 미치게 된다.

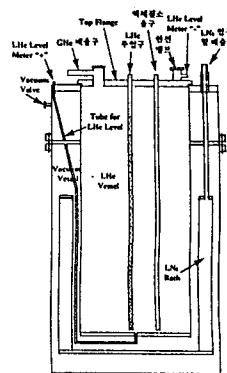
4. Current Lead and Cryostat

가. 전류도입선 (Current Lead)

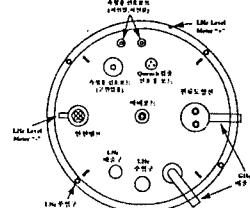
전류도입선은 극저온 상태의 마그네트와 상온상태의 전원을 연결하는 부위로써, 외부의 열이 극저온 보존용기로 침입할 수 있는 열적 예기들이 된다. 뿐만 아니라 전류도입선은 초전도 상태가 될 수 없는 부위이기 때문에 저항손실에 의한 주울열이 발생하게 된다. 따라서 전류도입선은 외부 열침입과 주울열의 발생을 최소화 할 수 있도록 길이 및 형상을 결정하여야 한다. 본 연구에서는 반경에 비해 냉매와 접촉하는 방열면적이 작은 원통형 보다, 방열면적이 크고 중립된 냉매 가스가 전류도입선을 통과하도록 효율적으로 전류도입선을 냉각할 수 있는 중팔형을 선택하였다. 중팔형 전류도입선은 단면이 직사각형인 스텐레스강 과이프와 이 과이프속에 설치된 망사형의 구리도선으로 구성된다. 구리도선은 망사형으로 구성하는 것은 헬륨가스의 흐름을 난류로 만들어 방열계수를 높이고 전자력에 의한 구리도선간의 흡입을 억제할 수 있어 방열면적을 크게 할 수 있기 때문이다.

나. 극저온 보존용기 (Cryostat)

극저온 보존용기는 진공조를 포함하는 2중용기로 구성되어 외부의 열침입을 막기하고, 마그네트를 내조에 설치하여 냉매인 헬륨을 충전하므로써 마그네트의 초전도 특성을 발현시키는 극히 중요한 부분이다. 다음 그림은 극저온 보존용기와 극저온 보존 8기의 덮개에 해당하는 "Top Flange"의 구조를 표시하고 있다.



극저온용기의 구조

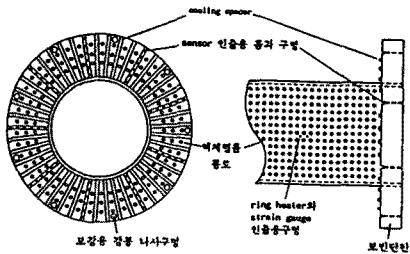


극저온용기의 상단플랜지

본 연구에 사용된 극저온 보존용기는 스텐레스강의 제진로씨, 마그네트의 에너지 충방전으로 인한 전류의 폴스적인 변화는 극저온 보존용기 밖에 외류를 발생시킬 수 있다. 이렇게 발생한 외류는 주울을 발생하여 헬륨의 증발 원인이 되므로 계산한 필요가 있으며, 이를 위해서는 마그네트와 극저온 보존용기 간의 상호 인터페스 계산이 가장 중요하다. 본 마그네트와 극저온 보존용기는 축대칭 동심원을 이루고 있으므로 이를 동심원을 각각 M , N 개의 Segment로 나누어 각 세그먼트간의 상호 인터페스와 자기 인터페스를 구하여 각 세그먼트의 외전류를 구할 수 있다.

5. 초전도 마그네트 제작

관선기를 이용하여 Bobbin에 코일을 관선하고로써 마그네트가 제작되며, 이를 위해 사용되는 관선기는 장력조절이 가능해야 하고, 정지동작시 장력이 유지될 수 있어야 하며, 초전도선 안내 기능과, 표시기능(전회수, 회전방향, 속도 등) 및 정역회전 기능을 가져야 한다. 또한 Bobbin 제작시는 냉각통로(Cooling Channel), 각종 센서인 인출용 구멍들을 고려하여 보빈 단판을 만들고 관선 양단에는 인출 Seat를 설치해야 한다. 관선 작업시는 마그네트의 반경방향 전자력에 의한 코일의 움직임이 없도록 계산된 인장력을 주어서 잡는다. 다음은 마그네트 보빈의 가공도를 표시하고 있다.



6. 계측용 센서

본 SMDS장비는 초전도 장치의 각종 전기적, 물리적 현상을 측정할 수 있는 여러 종류의 센서를 쥐부 하였으며, 다음과 같이 크게 4종류로 구분할 수 있다.

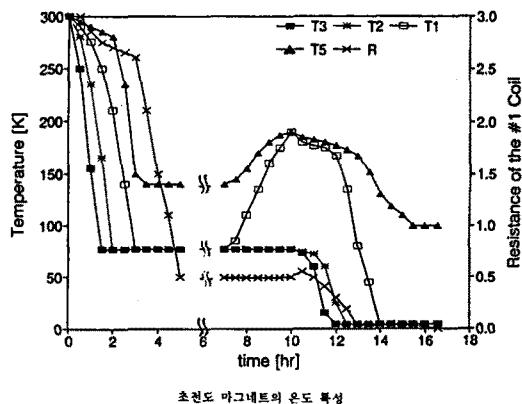
- 고압밀(코일의 각 층에서 인출된 천연 측정용)
- Quench 점출용 천연밀
- 온도 측정용 단자(극저온 보존용기에 장착된 마그네트 3부위, 전류도입선 2부위의 온도 측정)
- 차장, 코일 Strain 측정용 단자 및 인위적 펜치발생 용 단자(Ring Heater)

7. 초전도 마그네트의 에너지 충방전시험

가. 초전도 코일의 냉각특성 시험

극저온 보존용기 내의 마그네트 및 전류도입선의 온도를 측정하기 위해서 다섯개의 온도센서가 쥐부 되어 있다. 마그네트를 초전도 상태로 유도하기 위해서는 실험중 여러 과정을 거치게 되는데 이때 온도센서에 의한 감시를 하므로써 극저온 보존용기 내의 초전도 상태를 파악할 수 있다. 다음 그림은 초전도 상태 유도를 위한 실험과정 동안의 마그네트 온도특성을 기록한 것이

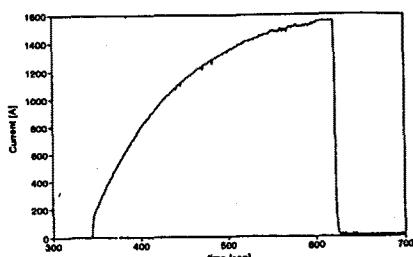
다. 그림의 5시간 동안은 액체질소에 의한 예냉기간으로써 이 기간 동안은 주입되는 액체질소가 대부분 증발하고 마그네트 하단부의 온도가 77K에 이른 시점에서 액체질소가 고이기 시작함을 알 수 있다. 이렇게 하여 질소는 코일 상단부까지 쌓이게 되며 코일의 저항은 서서히 감소하기 시작한다. 액체질소 주입 후 약 3시간이후 부터는 코일이 전체적으로 냉각되어 약 5시간이 지나면 액체질소의 기화열인 77K 이르며 이때의 저항은 상온시 저항의 약 1/6수준으로 감소한다. 이 시점부터는 액체질소의 냉각 효과가 다이아 없으로 액체질소를 Purge하고 액체헬륨으로 바꾸어야 하는데 이 작업을 하기 전 마그네트가 전체적으로 질소의 액화온도까지 냉각되도록 충분한 허지기간을둔다. 액체질소를 Purge하는데는 약 3시간정도의 시간이 소요되었으며, 이 과정이 진행되는 동안 전류도입선과 코일 상단부의 온도는 약 200K 까지 상승하였으나 코일 중단, 하단부의 온도는 변화 없이 77K를 유지하였다. 액체헬륨으로 교체하기 시작하여 약 2시간이 지난후 코일부의 온도가 액체질소와 동일한 온도인 4.2K에 이르렀으며, 코일의 저항은 계속 감소하다가 어느 시점에서 감자기 '0'으로 떨어졌음을 알 수 있다.



초전도 마그네트의 온도 특성

나. 코일의 정격전류 충전시험

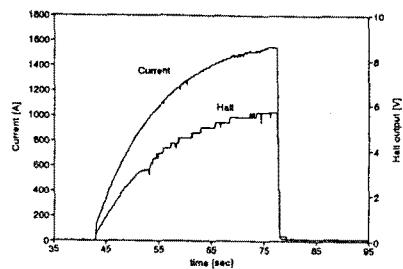
초기 충전장치를 수동제어 모드로 하여 충전전류를 정격인 1550[A]까지 충전시켰으며 충전 시간에 따른 전류의 변화는 다음과 그림과 같다. 그림에서 충전전류의 증가가 직선이 되지 못하는 것은 절류용 변압기의 누설 임피던스와 저류 케이블 등에 의한 전압 강하가 전류 증가와 더불어 증가하기 때문이다. 그림에서 알 수 있듯이 정격전류로 약 30초간 유지하여도 양호하게 초전도 상태를 유지하고 있음을 알 수 있다. 그림에서 전류가 감자기 '0'으로 떨어진 것은 펜치보호 저항의 값을 알아보기 위해 강제로 펜치시켰기 때문이다. 펜치보호 저항은, 그림에서 시정수가 $(L/R) = 0.85\text{Sec}$ 이므로 보호저항은 $R = 0.496(0.422/0.85)$ 임.



다. 차장측정

차장의 세기를 측정하기 위해 Hall Sensor를 위치하였으며 측정결과는 그림과 같다. 사용된 헌센서의 공정전류가 210[mA]이나, 실제 훌려준 전류가 200[mA]이므로 측정결과의 감도는 210[mA]의 것으로 보정하여야 한다. 측정된 출력전압과 차장의 관계는 다음 식으로 표현되며 이 식에 의하여 차장의 크기를 구할수 있다.

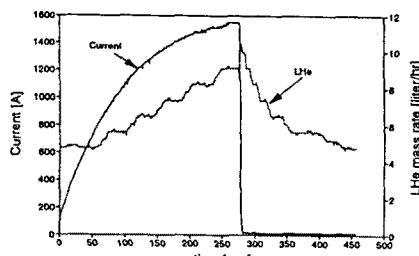
$$\text{식} \dots 80.9/1000 \times 200/210 \times T \times 2 \times 10 = V$$



코일 전류와 Hall Sensor의 출력

라. 천류도입선 및 극저온 용기의 액체헬륨 소비량 측정

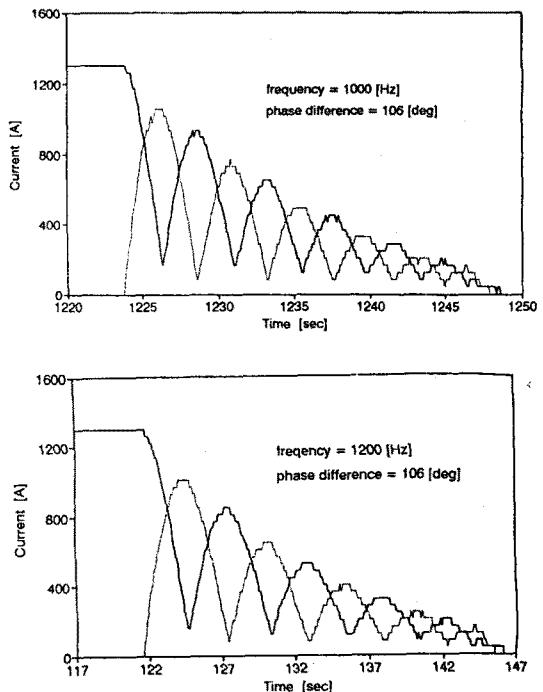
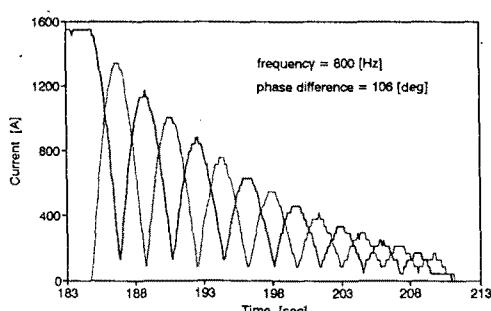
천류도입선 및 극저온 용기에서 발생하는 손실을 헬륨의 증발량으로 알아보기 위한 것이다. 측정결과는 다음의 그림과 같다.



초기충전동안의 코일 전류 및 헬륨소모량

마. 두 마그네토간의 에너지 축방전 시험

초기충전장치를 통하여 마그네토1을 정격전류로 충전시킨 후 그 저작된 에너지를 웨스콘신 브릿지에 의해 코일2로 방전시키는 시험으로써, 이 시험은 통하여 두 마그네토간의 에너지 수수특성을 알수 있다. 본 시험에서는 웨스콘신 브릿지의 제어 주파수 및 침호각을 변경하면서 여러가지 형로로 측정하였으나 여기서는 그중 몇가지 측정결과만 소개한다. 다음 그림은 에너지 수수시험의 측정결과를 보이고 있다.



III. 결 론

본 연구를 통하여 0.5MU 안정화용 초전도 에너지 저장장치의 개발 및 시험을 성공적으로 수행하였으며 이 분야 기술개발에 새로운 전기를 마련했다고 생각하며, 이번에 개발된 시작품은 선진국가들의 대용량기기 개발기술에 비하면 크게 미흡한 면이 있으나 이분야의 국내 기술개발을 위한 연구기간이 충분히 않았음을 감안할때 커다란 성과라고 할수 있다. 본 연구를 통하여 얻어진 각종 기술 및 본 시작품은 앞으로의 개발연구에 크게 활용될수 있을 것으로 생각하며, 특히 안정화용 초전도 에너지 저장장치는 저장용 SMES에 비하여 훨씬 적은 규모로도 개통안정에 커다란 효과를 나타낼수 있다는 장점으로 인하여 선진국의 경우 이 분야에 대한 연구가 활발히 진행되고 있을뿐만 아니라 실용화급 기기를 개발하여 실증시험을 하고 있을정도로 그 실용화 시기가 임박해 있는 실정이다. 이런 현실을 감안할때 국내 SMES 개발연구도 가급적 활발히 진행되어야 하겠다.

참 고 문 헌

- [1] Martin N. Wilson, Superconducting Magnets, Clarendon Press Oxford, 1983
- [2] D. B. Montgomery, R. J. Wegner, Solenoid Magnet Design Robert E. Krieger Pub. Company, Huntington N. Y., 1980
- [3] Wisconsin Superconductive EnergyStorage Project, Vol. IV
- [4] Y. Iwasa, "A Critical Current-Margin Design Criterion for High Performance Magnet Stability", Cryogenics, Dec. 1979.