

## 초전도 펄스 마그네트 선재설계에 관한 연구

### A Design Study on Superconducting Monolith For Superconducting Pulse Magnet

羅 浣 洙\* · 韓 松 曄\*\* · 黃 錫 永\*\*\* · 李 承 院§  
 (Wan-Soo Nah · Song-Yop Hahn · Seuk-Young Hwang · Sung-Won Rhee)

#### 요 약

본 논문에서는 일정 에너지 저장 용량을 가지면서, 빠른 시간(1-2sec)에 에너지 충방전이 이루어지는 초전도 펄스 마그네트의 설계에 필요한 선재설계 기법에 관한 연구가 행하여졌다. 선재의 형태는 모노리드 형태이고, 설계기법상 안정도 측면과 교류 손실측면으로 구분하여 접근하였다. 확장된 설계 파라메타들은 두가지 측면의 설계조건을 모두 만족하였으며, 최종적으로 선재를 압착 하여 편선을 용이하게하는 한편, 필라멘트 전위 효과를 얻었다.

**Abstract-** In this paper, a design study on the superconducting monolith for superconducting pulse magnet is described. Both stability and AC loss parameters are used in the design process, which restricted various design parameters. Determined design parameters satisfy both stability and AC loss restrictions. Finally superconducting monolith is flattened, fitting for magnet winding and acquiring transposition effect.

#### 1. 서 론

초전도 에너지 저장 장치(Superconducting

Magnetic Energy Storage : SMES)는 고효율성(90% 이상), 고속응성(수십 msec), 대용량화의 잇점, 입지 선정의 자유도가 큰점등으로 전력 계통의 계획과 이용을 발전과 저장이라는 이원적 측면에서 쉽게 해결할 수 있는 전력 저장 장치로서 최근 그 연구가 활발히 진행 중에 있다.[1] 이런 SMES는 전력 저장용으로써 뿐만 아니라, 이 시스템의 고속응성으로 말미암아 전력 계통 안정화 용으로도 크게 각광 받고 있다.[2] 전력 계통 안

\*正 會 員 : 서울대 工大 電氣工學科 博士課程  
 \*\*正 會 員 : 서울대 工大 電氣工學科 教授 · 工博  
 \*\*\*正 會 員 : 檀國大 工大 電氣工學科 教授 · 工博  
 §正 會 員 : 서울대 工大 電氣工學科 名譽教授 · 工博  
 接 受 日 字 : 1990年 4月 11日  
 1 次 修 正 : 1990年 7月 2日

정확용 SMES 시스템은, 전력 변환장치부와 초전도 마그네트 부분으로 이루어져 있는 I-C 유닛(Inductor-Conductor unit)로 구성되며, [3] 이 시스템의 주체를 이루는 초전도 마그네트는 일종의 펄스 마그네트(Pulse magnet)이고 이러한 대전류 용량을 가진 고속 에너지 충방전 장치의 필요성이 날로 증가하고 있다. [4] 이러한 필요성에 따라서 본 연구에서는 초전도 펄스 마그네트에 대한 설계 기법 연구를 수행하고, 차기 연구에서는 직접 제작 시험할 예정이다. 본 마그네트의 설계는 크게 다음 두 가지의 부분으로 요약될 수 있다.

첫째로 일정 에너지 저장 용량을 갖는 조건하에서, 초전도 선재의 양을 최소화하는 방향으로 마그네트의 형상을 결정하고 냉각 채널(Cooling channel)등을 설계하는 부분과, 둘째로 에너지 충방전에 수반되는 자장 변화에 대응해서 안정도(Flux jump stability, Cryostability)와 교류손실(AC loss) 측면에서 강인한 초전도 선재를 설계하는 부분이다. 본 논문에서는 후자에 대하여 기술한다. 선재 설계 과정은, 일반 상용 초전도선의 설계 과정에도 적용 할 수 있으며, 특별히 0.5MJ 초전도 펄스 마그네트 용도에 적합한 초전도 선재의 설계 과정을 기술했다.

초전도 선재의 형태로는 여러가지 선재(Strand)를 모아서 제작하는 케이블 또는 브레이드(Braid) 형태와 두꺼운 Strand 모양(A very thick strand)의 모노리드(Monolith) 형태로 나눌 수 있다. 본 연구에서는 모노리드 선재를 선택하여 설계를 진행한다. [5] 선재 설계시에 고려하여야 할 요소들은 자속 점프(Flux jump) 안정도 이론, 저온 안정도 이론(Cryostability), 저교류 손실(Low AC loss)등이다.

설계에서의 단위계의 선택은 CGS 실용 단위계(Practical Unit)로 하고, 초전도체로서는 기계적 특성이 가장 우수한 NbTi 금속 초전도체를 사용하며, 매트릭스(Matrix)로서는 구리(Cu)와 CuNi를 사용한다.

2. 안정도 측면에서의 설계

설계되는 초전도 선재의 정격자장의 세기는 5[T]이고, 자장 변화율은 5[T]/sec를 기준으로 한다. 따라서 설계시 사용되는 각종 물성치도 5[T]하에서의 데이터를 이용하며, 표 1은 이것을 나타낸다. 설계시 결정되는 파라메타는, 필라멘트 직경, 선재 직경, 트위스트 피치, 횡단 저항률 등이다.

표 1 설계에 사용되는 각종 물성치<sup>(5),(6),(19)</sup>  
Table 1 Physical Properties for Conductor

	값	표기
임계 전류 밀도 4.2K, 5T	$1.7 \times 10^5 [A/cm^2]$	$J_c$
$\Delta T = J_c / (-dJ_c/dT)$	4.8[K]	$\Delta T_0$
초전도체 비열, 4.2K	$5.3 \times 10^{-3} [J/cm^3 K]$	$C_{sc}$
구리 비열, 4.2K	$0.8 \times 10^{-3} [J/cm^3 K]$	$C_{cu}$
초전도체 열 전도도, 4.2K	$2 \times 10^{-3} [W/cm K]$	$K_{sc}$
구리 열 전도도, 4.2K, 5T	$2.3 [W/cm K]$	$K_{cu}$
구리의 비저항, 4.2K, 5T	$3.1 \times 10^{-8} [\Omega cm]$	$\rho_{cu}$
CuNi의 비저항, 4.2K	$3 \times 10^{-5} [\Omega cm]$	$\rho_{cuni}$
점적율	0.25	$\lambda$
시간에 대한 자장 변화율	50,000[Oe/sec]	$\dot{H}$

가. 필라멘트 설계 조건

초전도체에 미소 열량이 침투할 때(Energy disturbance), 그로 인하여 초전도체의 온도가 상승하고, 상승한 만큼 임계 전류 밀도가 감소하면서 내부의 자장이 재 분포하게 된다. 이 때 또 다시 열이 생성되면서 초전도체의 온도를 상승시킨다. 이와 같은 일련의 과정이 급속히 진행되는 현상을 자속 점프라고 한다. [7~8] 이러한 자속 점프에 대해서는 초전도체의 직경을 가능하게하여 필라멘트 구조로 제작하게 되면, 근본적으로 자속 점프에 대해 강인한 초전도 선재가 된다. 이와 같이 필라멘트의 직경을 제한하는 이론으로는 단열 안정 이론(Adiabatic stability), 와 동적 안정 이론(Dynamic stability)이 있다. 단열 안정 이론은 고립된 초전도 필라멘트(Isolated superconducting filament)가 그 모델이며, 이 이론하에서 다음 식의 제한을 받는다. [8]

$$W \leq \sqrt{10^9 f_i C_{sc} \Delta T_0} / J_c \tag{1}$$

- 단  $W$  : 필라멘트의 직경[cm]
- $f_i$  : 모델에 따른 보정 상수,  $2/\pi - 3/\pi$
- $\Delta T_0$  :  $J_c / (-dJ_c/dT)$  [K]
- $J_c$  : 임계 전류 밀도  $[A/cm^2]$
- $C_{sc}$  : 초전도체 비열  $[J/cm^3 K]$

윗 식에 표1의 제 상수를 대입하면 직경은 237 $\mu m$ 보다 작아야 한다. 위와 같이 1개의 초전도체 필라멘트로 제작되는 선재의 임계 전류의 크기는 미미하므로, 대 전류 초전도 선재를 제작하기 위해서는 여러 개의 필라멘트를 병렬(Multifilamentary structure)로 사용하여야 한다.

이 때 필라멘트끼리 직접 접촉하면 초전도체의 미세 필라멘트 효과가 사라져 버리므로, 초전도 선재는 필라멘트가 매트릭스에 박혀 있는 복합도체의 형상을 가지게 된다. 이런 복합 도체의 매트릭스를 구성하는 물질은 자기 확산도(Magnetic diffusivity)가 낮고 열 확산도(Thermal diffusivity)가 높아야 한다. 즉 자속 점프시에 자기적 유동을 시간상 지연시키고, 또 초전도체에서 발생하는 열을 신속히 제거시켜주는 것이 필요하며, 이러한 성질은 구리나 알루미늄으로 구현된다. 동적 안정 이론은 이와 같은 복합 도체에 적용되며, 이에 의해 필라멘트의 직경은 다음식을 만족하여야 한다. [7~8]

$$W \leq \sqrt{8(K_{sc}/\rho_{cu}) \Delta T_0(1-\lambda)/(J_{AV}J_c)} \quad (2)$$

단  $K_{sc}$  : 초전도체의 열 전달 계수 [ $W/cm K$ ]

$\rho_{cu}$  : 구리의 비저항 [ $\Omega cm$ ]

$\lambda$  : 점적율

$J_{AV}$  :  $\lambda J_c$

식(2)에 역시 표 1의 채 상수를 대입하면 직경은  $160\mu m$ 보다 작아야 한다. 특기할 만한 사실은, 저온 안정 이론(Cryostability)에 의하여 유도되는 필라멘트 크기의 제한식과 [9] 식(2)가 같다는 것이다. 이것은 초전도체의 상전이와 이로 인한 열이 구리 매트릭스로 전달되는 매카니즘(Dynamic mechanism) 측면에서 두 이론이 궁극적으로 같기 때문이다.

나. 트위스트 피치 설계 조건

멀티 필라멘트 형태의 복합 도체 초전도 선재는 외부 자장 변화에 대하여 필라멘트간에 자기적으로 결합(Electromagnetic coupling)이 발생하게 된다. 이것은 필라멘트들이 자기적으로 독립되어 있지 않고, 자기적인 덩어리(Bulk)로서의 특징을 갖게됨을 뜻하며, 따라서 미세 필라멘트 효과가 사라지게 되고 또 안정도를 크게 떨어뜨린다. 뿐만 아니라 펄스 동작(Pulse operation)시에 과도한 교류 손실을 수반하게 된다. 그러므로 필라멘트간의 자기적 결합을 제거(Decoupling)해야 하며, 이것은 각 필라멘트를 트위스팅(Twisting) 시킴으로써 가능하다 [7, 8] 이런 효과를 얻기 위해서는 트위스트 피치를 어느 일정 길이인 임계 트위스트 피치(Critical twist pitch)보다 작게 해야 하며, 이것은 다음 식으로 표시된다. [9]

$$l_c^2 = \frac{2 \times 10^8 \rho_{\perp} J_c W}{H_a} \sqrt{\lambda} \frac{D_s}{D_s + W} \quad (3)$$

단  $l_c$  : 임계 트위스트 피치 [cm]

$H_a$  : 외부 자장 변화율 [ $Oe/sec$ ]

$\rho_{\perp}$  : 매트릭스 수직 저항율 [ $\Omega cm$ ]

$D_s$  : 필라멘트 사이의 거리 [cm]

$L_p$ 를 트위스트 피치라 하고,  $l_p = 1/4 L_p$ 로 하면 안정도 측면에서  $l_p < l_c$ 를 만족하여야 한다. Wilson [9]에 의하면  $l_p/l_c \leq 0.2$ (즉  $L_p \leq l_c$ )를 만족시키면, 교류 손실의 와전류손(Eddy current loss) 측면에서 자기적 결합을 약 90%정도 제거 가능하다. 안정도 측면에서, 트위스트 피치와 필라멘트 직경과의 관계는 경험적으로 다음식이 알려져 있다. [9]

$$W_{eff} = W(1 + (l_p/l_c)^2) \quad (4)$$

즉 자기적 결합에 의하여 필라멘트 직경이  $(l_p/l_c)^2$ 의 양 만큼 증가되는 효과를 보인다. 식(3)에서  $W = 160[\mu m]$ ,  $D_s/(D_s + W) \cong 1$ 로 놓고 표 1의 값을 대입하여 얻은  $l_c$ 는 0.4cm이다.

다. 선재 직경 및 필라멘트 수에 대한 설계 조건

선재 직경  $D$  및 필라멘트 수  $N$ 은  $L_p/D$ 의 제한 요소와, 선재에 흐르는 전류(Transport current)에 의하여 자기 자장 효과(Self field effect)에 의

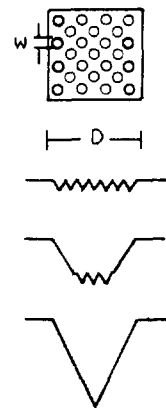


그림 1 멀티 필라멘트 초전도 선재의 자기적 결합도 (I, II, III은 각각 자기적 결합이 작을때, 중간의 경우, 그리고 클때의 지속분포 개념도를 보여준다)

Fig. 1 Schematic Diagram of Field Penetration into a Multi-filamentary-Composite Superconductor (I, II, III show three coupling levels, corresponding to small, intermediate and large, respectively)

하여 제한을 받으며, 여기에서 각각에 대하여 설계 제한 조건을 살펴 본다.

그림 1은 멀티 필라멘트 초전도 선재의 자기적 결합 정도를 나타낸다. 즉 I는 자기적 결합이 완전히 제거 되었을 때 자장의 분포이고, III는 완전한 자기적 결합이 이루어진 상태이다. II는 그 중간 상태를 보인다. I 상태의 자화율(Magnetization)을  $M_o$ 로 놓으면, 임의의 상태의 자화율을  $M$ 은 다음 식으로 유도될 수 있다. [8]

$$\frac{M}{M_o} = 1 + \frac{4\eta}{\lambda^{1/2}} \left[ 1 - 0.5 \frac{W}{D} \right] V - \frac{4\eta}{\lambda} \left[ \frac{W}{D} \right] V^2 \quad (5)$$

단  $V : (l_p/l_c)^2 = \dot{H}_a/\dot{H}_c$   
 $\dot{H}_a$  : 인가 자장의 변화율  
 $\eta$  : Efficiency Factor

윗 식에서  $V$ 는  $H_a$ 와  $\dot{H}_c$ 의 비 또는  $l_p^2$ 와  $l_c^2$ 의 비이고, 이 관계는 식(3)에서 부터 유도된다. 그리고  $\eta$ 는 트위스트 피치 내에서 선재 방향을 따라 변화하는 자기 결합 정도를 나타내고,  $2/3 < \eta < 1$  사이의 값을 가지며, [8]  $\dot{H}_a$ 의 크기에 따라서 결정된다.  $\eta=2/3$ 을 취하고 수치적으로 작은 항을 무시하면 식(5)는 다음식으로 표시된다.

$$M = M_o \left[ 1 + \frac{8}{3\sqrt{\lambda}} \left( \frac{l_p}{l_c} \right)^2 \right] = M_o(1 + \alpha_m) \quad (6)$$

식(3)를 식(6)에 대입하면,

$$M = M_o \left[ 1 + \frac{4}{3 \times 10^8} \left( \frac{l_p^2}{W\lambda J_c} \right) \frac{\dot{H}_a}{\rho_{\perp}} \right] \equiv M_o(1 + \alpha_m) \quad (7)$$

그런데  $\lambda = NW^2/D^2$  이므로 식(7)에서 둘째항을  $\alpha_m$ 으로 놓으면,

$$(L_p/D)^2 = \frac{12 \times 10^8}{\dot{H}_a} \left[ \frac{\alpha_m \lambda^2}{WN} \right] \rho_{\perp} J_c \quad (8)$$

로 표시된다. 여기서  $\alpha_m$ 은 초전도 선재의 자기적 결합 정도를 나타내며,  $l_p=0$ 일 때는  $\alpha_m=0$  즉 자기적 결합이 없는 상태이다.  $\alpha_m$ 에 대해서는 교류 손실을 다룰 때 언급된다. 또한 식(8)의  $L_p/D$ 는 선재 제작상의 이유로 인해서 5 이하의 값을 갖기가 어렵다. [6, 10] 일반적으로는  $L_p/D \geq 5$ 를 기준으로 한다.  $L_p/D=5$ 를 식(8)에 대입하면  $N_{max}$ 는,

$$N_{max} = \frac{12 \times 10^8}{25W} (\lambda^2 \rho_{\perp} J_c) (\alpha_m/\dot{H}_a) \quad (9)$$

가 되고,  $\alpha_m=0.2$ 일 때  $N_{max}=4$ 로 제한을 받는다.

이제 자기 자장 효과에 의한 제한 조건을 살펴

보면 다음과 같다. 앞에서 언급된 필라멘트 트위스팅 방법은, 균일한 외부 자장(Uniform external magnetic field)의 시간적 변화에 대하여 자기적 결합을 제거하여 준다. 그러나 불균일한 외부 자장의 시간적 변화 또는 필라멘트 상에 흐르는 전류(Transport current)에 기인한 자기적 결합에 대하여는 해결책을 제시하지 못한다. 그것은 트위스팅에 의해서는 필라멘트 사이의 상대적 위치를 바꿀 수 없기 때문이다. 필라멘트 전류에 기인한 자기 자장(Self field)의 공간적 기울기(Gradient)에 의하여 전류는 선재 외부 쪽의 필라멘트에 치우쳐서 흐르게 되며, 마치 이것은 고전적 AC선재의 표피 효과(Skin effect)와 비슷한 양상을 띤다. 이와 같이 형성된 선재의 가장 바깥 쪽 자장  $H_s$ 가 자속 점프 자장  $H_{fj}$ (Flux jump field)보다 커지면 자속 점프가 발생된다.

$$K\lambda J_c(D/2) = H_{fj} \quad (10)$$

윗 식은 맥스웰 방정식에 의하여 유도될 수 있고,  $K$ 는 인접 필라멘트의 자속 점프에 미치는 정도(자기적 결합 정도)에 따라서  $2\pi/10-4\pi/10$ 의 값을 가지며, [8] 여기에서는 혹독한 조건인  $K=4\pi/10$ 를 선택한다. 또  $H_{fj}$ 는 식(11)을 만족하고, [11] 보통  $2-3$ [kOe]의 값을 가지며, 표 1의 값에 의하면  $2.8$ [kOe]의 값을 가진다.

$$H_{fj}^2 = 10^7 \pi^3 C_{sc} J_c / (-dJ_c/dT) \quad (11)$$

또한 식(10)은 선재 직경 뿐만 아니라, 필라멘트 직경에 대해서도 똑같이 적용 가능하며, 이 때는

$$K J_c(W/2) = H_{fj} \quad (12)$$

가 되며, 식(10), (12)에서부터  $\lambda D > W$ 이면, 임계 전류 밀도  $J_c$ 는 필라멘트가 자기적으로 독립 경우인 때의 자속 점프 불안정도보다 자기 자장에 의한 자속 점프(Self field induced flux jump)에 의하여 더 큰 제한을 받게 된다. 따라서 일정  $J_c$  조건에서 최대 선재 직경  $D_{max}$ 는 제한을 받게 되고, 식(1)과  $\lambda D < W$ 의 조건에서 부터 다음과 같은 제한을 받는다.

$$D_{max} = \sqrt{10^9 f_i C_{sc} \Delta T_o / \lambda J_c} \quad (13)$$

표 1의 수치에 의하면  $D_{max}=0.15$ [cm]가 된다.

앞에서 언급했듯이 자기 자장 효과는 트위스팅에 의해서는 제거가 불가능하며, 선재 전체에 대해서 일정한 전류 밀도를 갖게 하기 위하여 필라멘트를 전위(Transposition)하는 것이 필요하다. 여러가지 선재를 어셈블하여 케이블로 제작하는경

우, 선재를 브레이딩(Braiding)하여 완전 전위하면(Fully Transposed System), 자기 자장 효과로부터 완전히 벗어날 수 있다. 따라서 이론적으로는, 어셈블하는 선재를 납작하게 제작함으로써(Flattening) 브레이딩 효과를 얻을 수 있다. 식(13)은 이러한 전위의 효과를 전혀 고려하지 않고 얻어진 수식이다. 즉 이상적인 완전 전류 포화된 비전위 선재(Fully current saturated untransposed composite)의 경우에 해당되는 수식이다. 여기서 전류 포화란, 외부 쪽 필라멘트에 한하여 포화 전류가 흐르고(Current saturated shell), 내부에서는 흐르지 않는 이상적인 자기 결합 상태를 말한다. 그러나 실제 모노리드 선의 제작시에는 압착을 해주므로 식(13)은 지나치게 엄격한 조건일 수 있다. 또 압착을 하지 않더라도 즉 전위해주지 않더라도 선재 자체에서 완전 전류 포화대(Fully current saturated shell)을 가질 수는 없다. 그러므로 전류 포화대 내부에 흐르는 전류  $I_{in}$ 이 존재하게 되고,  $I_{in}$ 이 증가할 수록 초전도선재 내부의 전류 분포는 균등하게 되어  $I_{in}$ 이 완전 전류 포화대에 흐르는 전류와 같아질 때, 자기 자장 효과는 완전히 제거될 수 있다. 이러한 효과는 식(13)의  $\lambda J_c$ 에 가중치 함수  $f(i)$ 를 곱하여  $\lambda J_c f(i)$ 가 됨으로써 구체화될 수 있다. 여기서  $f(i)$ 는 다음 식과 같이 표현된다. [8, 12]

$$f(i) = [i(2-i) + 2(1-i) \ln(1-i)]^{1/2} \quad (14)$$

여기서  $i = I_{sat}/I_c$ 이며,  $i$ 는 필라멘트를 트위스팅 함으로써, 또는 단순히 흐르는 전류(Transport current)를 낮게 해 줌으로써 조절할 수 있다. 이것은 식(13)의 D값 조절이 가능하게 됨을 의미한다. 한편 식(13)은 식(1)에서 부터 유도되었듯이 단열조건(Adiabatic Condition)일 때의 선재 직경 제한 조건이다. 초전도 선재가 냉매(Cryogen: LHe)에 직접 접촉하는 경우는 단열 안정 조건에 의한 식(13)보다는 동적 안정 조건에 의하여 선재 직경을 제한 해야 한다. 동적 안정 조건에 의한 선재 직경의 크기는 단열안정조건 조건에 의한 선재직경의 크기에 보정상수를 곱하여 얻을 수 있으며, Duchateau에 의하면[15] 보통 4의 값을 가진다. 이때 표 1에 의한  $D_{max}$ 의 수치는 0.6cm가 된다.

### 3. 교류 손실 측면에서의 설계

초전도 선재의 교류 손실에는 초전도 선재 자체의 히스테리시스 손실(Hysteresis loss)과 자기적

결합(Coupling)에 의한 와전류손(Eddy current loss)이 존재하게 되며, 이러한 손실을 극소화시키면서 현실적으로 제작가능한 선재를 설계해야 한다. 교류 손실 계산에 쓰이는 수식들은, 인가되는 주파수에 따라서 저주파 영역(Low frequency region;  $f < f_{c1}$ ), 중간주파영역(Intermediate frequency region;  $f_{c1} < f < f_{c2}$ ), 표피 효과 영역(Skin effect region;  $f > f_{c2}$ )으로 구분될 수 있고 [6, 14] 이와같은 영역 구분은  $\alpha_m$ 과 관계가 있으며, 본 마그네트는 저주파 영역에 해당한다. 이 영역에 해당하는 단위 체적당 히스테리시스 손실  $\dot{Q}_h$ 와 와전류 손실  $\dot{Q}_e$ 는 다음 식으로 표현된다. [14]

$$\dot{Q}_h / V = 8 / (3\pi \times 10^8) W \lambda J_c H_m f \quad (16)$$

$$\dot{Q}_e / V = 1 / (2 \times 10^{16}) L_p^2 / (\rho_{\perp} H_m^2 f^2) \quad (17)$$

단  $f$  : 인가주파수

$H_m$  : 인가 정현파의 최대치

한편 식(6), (7)에서 초전도 선재의 자기적 결합정도를 나타내는데 사용되었던 파라메타  $\alpha_m$ 은, 궁극적으로는 선재의 와전류손과 히스테리시스손의 비를 나타내고[6, 14] 인가자장 파형이 정현파일때, 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\alpha_m = \dot{Q}_e / \dot{Q}_h = 3 / (2 \times 10^8 W \lambda J_c) (l_p^2 / \rho_{\perp}) H_a \quad (18)$$

또한 식(18)의 히스테리시스손은 외부자장에 대한 수식이며 자기자장(Self field)에 의한 히스테리시스손  $\dot{Q}_{hs}$ 가 존재하며, 단위체적당  $\dot{Q}_{hs}$ 는 다음식으로 표현된다. [14]

$$\dot{Q}_{hs} / V = 0.05 (5/10^{10}) \pi f (\lambda J_c D)^2 \quad (19)$$

마지막으로  $\dot{Q}_{hs}$ 와  $\dot{Q}_h$ 의 비로서 파라메타  $\alpha_s$ 를 도입하면 다음과 같다.

$$\alpha_s \equiv \dot{Q}_{hs} / \dot{Q}_h \quad (20)$$

가, 필라멘트 설계조건

식(16)에서부터 파라메타 직경  $W$ 가 작을수록 히스테리시스손이 감소하는 것을 알 수 있다. 이것은 안정도 측면에서의 필라멘트 선재 직경 제한 조건과 일치하며, 따라서 필라멘트직경은 제작상 또는 경제적인 측면이 허락하는 한 작게하는 것이 좋다.

나, 트위스트 피치 설계조건

식(17) 및 식(18)은 트위스트 피치가 작을수록 와전류가 감소한다는 것을 보인다. 이것역시 자속점프 안정도 이론에서의 조건과 일치하며 따라서 트위스트 피치도 작게해주는것이 바람직하다. 그

러나 앞에서 언급했듯이  $L_p/D \geq 5$ 를 만족해야 하는 제한이 따른다.

다. 선재직경 및 필라멘트 수에 대한 설계조건

선재직경 및 필라멘트 수에 대하여서는, 와전류손 및 자기장장애의한 히스테리시스손을 줄이는 방향에서부터 제한조건이 발생한다. 즉, 와전류손을 줄이기 위하여  $\alpha_m$ 을 제한하게 되고, 식(9)에서부터  $\alpha_m$ 조절에 따라서 필라멘트수가 제한됨을 알 수 있다. 따라서 와전류손 저감에 대한 선재직경 제한 조건식은 식(9)와 등가이다. 한편, 식(19) 및 식(20)에서부터,  $Q_{hs}$ 를 줄이기 위해서는  $D^2$ 를 감소시켜야 함을 알 수 있다. 그러므로, 선재직경은 식(20)에서부터 다음과같이 제한을 받는다.

$$D_{max}^2 = \frac{H_m W a_s}{0.2 \times 0.05 \lambda J_c} \quad (21)$$

초전도 선재설계는 지금까지의 조건들을 고려하여 설계를 시행하며 끝으로 선재의 횡단면 저항률  $\rho_{\perp}$ 를 결정한다. 식(3)를 식(6)에 대입하여 결과식을 식(21)로 나누어 주면,

$$\dot{H}_a H_m = 1.2 \times 10^7 \rho_{\perp} \lambda^2 (1/l_r^2) (\alpha_m / \alpha_s) \quad (22)$$

가 성립한다. 여기서  $l_r$ 는 상대트위스트피치이며  $l_r = L_p/D$  이다.

윗 식이 의미하는 것은 일반적으로  $\alpha_m$ ,  $\alpha_s$  및 기타 여러 파라메타들이 고정되었을때, 또  $\dot{H}_a$ ,  $H_m$  등의 설계조건이 주어져 있을때, 횡단 저항율을 조정함으로써 설계시 요구조건들을 만족시킬 수 있음을 뜻한다. 횡단저항율의 조정은 매트릭스에 구리뿐 아니라, 고저항의 CuNi를 같이 사용하여 이들의 비율을 조절함으로써 가능하다. 보통 CuNi를 초전도 필라멘트 주위에 감싸줌으로서, 저항벽(Resistive barrier, Eddy current barrier)을 형성시켜, 이것의 두께등이 조절된다. CuNi는 구리보다 고저항이며 동시에 열전도도 현저히 떨어진다. 따라서 위와같이 초전도 필라멘트 주위에 직접 CuNi로 저항벽을 형성시키는 방법은 안정도를 떨어뜨리게 된다. 그러므로 이와같은 저항벽을 두는 것이 보다 효과적이다.

#### 4. 0.5MJ 초전도 펄스 마그네트 용 선재설계

앞에서 언급한바와 같이, 필라멘트 직경은 안정도 측면에서는 작을수록 유리하다. 초전도 선재 제작사와의 합의하에 [5, 17]  $42\mu\text{m}$ 로 하며, 임계전류가  $2000 \sim 3000[A]$ 가 되도록 [17, 19] 필라멘트 수를 918개로 한다. 이 때 임계전류는

$2162[A]$ 가 된다. 그리고 와전류손과 히스테리시스손의 비인  $\alpha_m$ 을 0.3이하로 하고,  $\lambda$ 를 0.25로 하면, 식(6)에서부터  $L_p < 0.24 l_c$ 를 만족해야하며, 이때 자기적 결합은 70%정도 제거될수있으며, 이것은 다음 식으로 표현될 수 있다.

$$L_p \leq l_c \quad (23)$$

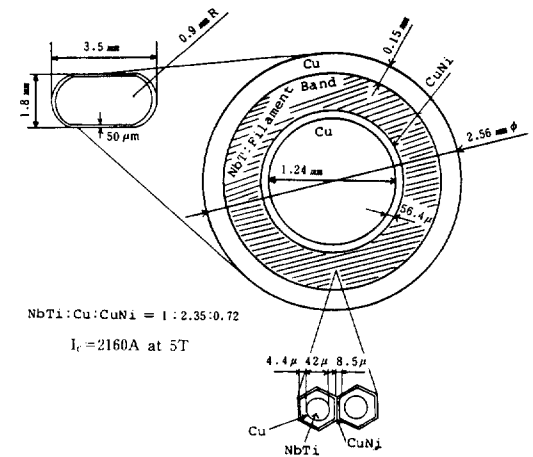


그림 2 초전도 선재의 단면

Fig. 2 Cross Sectional View of Superconducting Monolith

표 2 설계된 초전도 선재의 각종 파라메타 및 사양

Table 2 Specification and Parameters of Designed Superconducting Wire

구분	수치	표기
필라멘트 직경	$42\mu\text{m}$	$W$
필라멘트 갯수	918	$N$
트위스트 피치	3cm	$L_p$
임계전류	2160A at 5 Tesla	$I_c$
횡단면 저항율	$7 \times 10^{-6} \Omega\text{cm}$	$\rho_{\perp}$
NbTi : Cu : CuNi	1 : 2.35 : 0.72	
임계 트위스트 피치	3.15 cm	$l_c$
와전류손과 히스테리시스손과의 비	0.3	$\alpha_m$
자기 히스테리시스손과 외부자장의 히스테리시스손과의 비	0.12	$\alpha_s$
단면 모양	Race Track	
크기	$1.8 \times 3.5\text{mm}$	
절연물	Polyvinyl Formal	
절연물 두께	$50\mu\text{m}$	
Tensile stress	$45\text{kg/mm}^2$ at 300K	

한편 자기자장에 의한 히스테리시스손과 외부자장에 의한 히스테리시스손과의 비  $\alpha_s$ 는 약 0.07~0.5의 값을 갖고, [6, 8]  $\alpha_s=0.13$ 일때 식 (21)에서부터, 선재 직경은 2.56mm가 된다. 그리고 식 (23)에 의하여  $L_p=3cm$ 로 하였을때  $\alpha_m=0.3$ 을 만족한다. 또한 매트릭스에 구리와 CuNi를 함께 사용하여, 횡단면 저항률의 값을 설계치와 일치시킨다. 이 때 필라멘트는 구리와 인접하게 하여 안정도를 높이고, 그 주위에 CuNi로써 저항벽을 형성시킨다. 이와같이 구성된 NbTi-Cu-CuNi 셀(Cell)들을 선재 동심원 상의 밴드(Band)로써 구현시키며, 밴드 내에는 구리를 채움으로써, 동량을 증대시킨다. 그리고 셀 밴드와 구리 사이에 CuNi환(Ring)내부 구리와외 저항벽 역할을 수행하게 함과 동시에, 환의 두께로써 횡단면 저항률을 조절하게 한다. 그리고 셀 밴드 주위는 안정도 측면에서, 구리로 감싼다. 이와같은 원 모양 단면을 가진 초전도 선재를 압연후에 평각 다이프로 선을 뽑아서 Race Track 형태로 성형한다. 그림 2는 설계된 초전도 선재의 단면을 보여준다. 이와같이 Race Track 형태로 성형하는 것은 앞에서 언급한 입작 과정에 해당하며, 이것은 마그네트 제작 시에 권선이 용이하다는 장점 이외에, 필라멘트를 부분적으로나마 전위 시켜서, 자기 자장 효과를 감소시키는 장점이 있다. 따라서 이와같이

제작된 초전도 선재는 모노리드 형태이지만, 기본 선재(Basic wire: Strand)를 여러개 묶어서, 안정화 재료(Stabilizer) 주위에 케이블링 시키는 고전류 용량의 초전도 케이블과 개념적으로 유사한 단면 모양을 가지게 된다. 절연물 로서는 폴리비닐 포말(Polyvinyl Formal)을 사용하며, 두께는 50 $\mu m$ 이며, Tensile stress는 약 45[Kg/mm<sup>2</sup>]이다. [16] 표 2는 설계된 초전도 선재의 각종 파라메타 및 사양을 보여 준다. 여기에서의 파라메타는 자장변화율이 5 Tesla/Sec 일때의 수치이다. 끝으로 그림 3은 초전도 선재 설계과정의 흐름도이다.

### 5. 결 론

본 논문에서는 0.5MJ 펄스 마그네트의 선재에 대한 설계기법 연구가 기술되었다. 설계 기법상, 자속 점프 안정도, 저온안정도 등의 안정도 측면에서의 설계와, 교류 손실 측면에서의 설계를 구분하여 접근하였고, 확정된 설계 파라메타들은, 앞에서 언급된 여러가지 제한조건들을 모두 만족하였다. 최종적으로, 원 모양의 초전도 선재를 압착하여, 마그네트 제작 시권선이 용이하도록 하였고, 또 선재내의 필라멘트들의 전위효과를 얻었다. 여기에서 설계된 초전도 선재의 제반 특성은 0.5MJ 초전도 펄스 마그네트의 설계에 이용되게 된다. [19] 본 논문에서 기술된 선재설계 과정은 일반 상용초전도 선재 설계에도 적용될 수 있으며, 앞으로의 초전도선재 분야 연구에 기초가 될 것으로 사료된다.

\*본 연구는 한국전력공사 기술연구원의 지원에 의한것임

### 참 고 문 헌

- [1] W.Hassenzahl, "Superconducting Magnet Energy Storage", IEEE MAG-25, March, pp. 750~758, 1989.
- [2] H.J. Boening et. al. "Commissioning Test of the Bonneville Power Administration 30 MJ Superconducting Magnetic Energy Storage Unit", IEEE, PAS-104, February, pp. 302~312, 1985.
- [3] Harold A. Peterson, "Introduction to Superconductive Energy Storage", Proceedings of

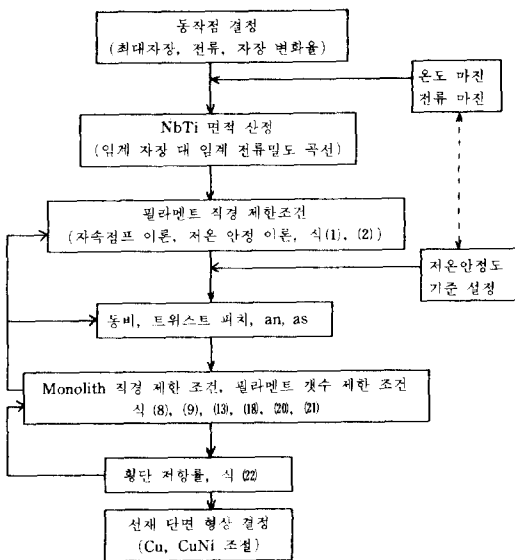


그림 3 초전도 선재 설계 과정 흐름도  
Fig. 3 Flowchart of Superconducting Monolith Design Procedure

- the US-Japan workshop on SMES, 1981.
- [4] T. Onishi, et. al. "Energy Transfer Experiments Between 3MJ and 4MJ Pulsed Superconducting Magnets" IEEE, MAG-21, 1985.
- [5] Private communications, Showa Electric Co.
- [6] E.W. Collings, "Applied superconductivity", Volume II, Plenum Press 1986.
- [7] Wilson, "Superconducting Magnets", Clarendon Press Oxford, 1983.
- [8] M.N. Wilson et al. "Experimental Theoretical Studies of Filamentary Superconducting Composites", J. of Physics, pp. 1517~1585, 1970.
- [9] Stekly Z.J.J. "Properties of Stability in Cooled Superconducting Magnets", J. of Physics, pp. 2238~2245, 1969
- [10] Duchateau J.L. "Self Field Degradation Effect in Adiabatic Conditions", Cryogenics, pp. 481~486, 1974.
- [11] Swartz & Bean, "A Model for Magnetic Instabilities in Hard Superconductors", J. of Physics, 1968.
- [12] London H. "Alternating Current Losses in Superconductors of the Second Kind", Physics Letter, pp. 162~165, 1963.
- [13] Duchateau J.L. & Turk B. "Theoretical & Experimental Study of Magnetic Instabilities in Multifilamentary Nb-Ti Superconducting Composites", IEEE MAG-11, pp. 350~353, 1975.
- [14] W.J. Carr, Jr. "AC Loss and Macroscopic Theory of Superconductors", Gordon and Breach, Science Publishers, Inc., 1983.
- [15] Duchateau, J. L. et al. "Dynamic Stability and Quenching Currents of superconducting Multifilamentary Composites under Usual Cooling Conditions", J. of Physics, pp. 4989-4995, 1975.
- [16] "0.5MJ 초전도 에너지 저장장치에 관한 연구", 한국 전력 공사 기술 연구원 연구 보고서, 1989
- [17] T. Onishi et al. "Construction of a 400 MJ-Class Pulsed Superconducting Magnet & Its Operating Characteristics", IEEE MAG-17, 1981.
- [18] "超電導工學 實驗ヤンター報告", 大阪大學, 1981
- [19] Battle Columbus Laboratory, "Handbook on Materials for Superconducting Machinery", 1977, 1975.
- [20] M.S. Lubell, "Emperical Scaling Formulus for Critical Field for Commercial NbTi", IEEE MAG-19, 1983.
- [21] Rogers J.D. "30 MJ Superconducting Magnetic Energy Storage for Stabilizing an Electric Transmission System", IEEE MAG-15, pp. 820~823, 1979.