

## The Design, Construction and Operational Characteristics of the Superconducting Persistent Current Switch

吳潤相\* · 李相鎭\*\* · 崔景達\*\*\* · 柳康植<sup>§</sup> · 高太國<sup>§§</sup>  
 (Yun-Sang Oh · Sang-Jin Lee · Kyeong-Dal Choi · Kang-Sik Ryu · Tae-Kuk Ko)

**Abstract** - Low power superconducting persistent current switch(PCS) for the superconducting magnet systems in the persistent mode was developed and its experimental results were analyzed when the system was charged or discharged. The multifilament NbTi wire with Cu matrix was used for the PCS. The constructed NbTi superconducting switch with superconducting magnet system operated successfully. It also operated on-off switching action with good stabilization. The maximum operating current in persistent mode was 60A (at 1T). In persistent current mode, the decay of the persistent current at 60A was observed. Its decay was 3.55% in 60 min. It is possible to make the persistent current switch with the better decaying of persistent current if some problems for joint resistance are solved.

**Key Words** : Persistent current switch(영구전류스위치), Persistent mode(영구전류모드), Superconducting magnet system(초전도자석 시스템), Current decay(전류감소)

### 1. 서 론

MRI, SMES, MAGLEV 등과 같은 초전도자석을 응용한 시스템들은 일반적으로 영구전류모드에서 운전되기 때문에 영구전류스위치(PCS)가 필수요소이다.[1-3] 이러한 영구전류스위치를 이용한 영구전류모드에서는 매우 안정되고 균일한 자기장을 얻을 수 있기 때문에 양질의 DC 전원을 대응할 수가 있다. 또한 영구전류모드에서 운전시 전원이 불필요하므로 열손실을 줄이고 운전비를 절감하는 등 여러 가지 투자비용을 감소시킨다. 따라서 상기의 초전도 응용시스템의 실용화를 위해서는 초전도 영구전류스위치의 개발이 필요하다. 본 연구에서는 초전도 영구전류스위치의 충·방전 모드에 관한 특성해석을 한 후, 전류인가시 발생가능한 자계 교란을 최소화시키며, 영구전류스위치가 가열될 때 발생하는 열손실을 최소화 하는 영구전류스위치를 설계하였고, 이에 따른 저손실 초전도 영구전류스위치를 시험·제작하였으며, 영구전류모드 확인 실험을 하였다.

### 2. 영구전류스위치의 동작 특성

그림 1은 영구전류스위치를 갖는 초전도자석 시스템의 등가회로이다. 정전압  $E$ 와 가변저항  $R(t)$ 를 조절하여 일정한 전류증가율로 원하는 동작전류  $I_0$ 를 만들 수 있는 자석용 DC 전원(MPS)으로 영구전류모드를 만든다. 단계별로 보면 히터전

류  $I_h$ 와 히터저항  $R_h$ 를 이용하여 영구전류스위치를 상전도상태로 만든 후, 초전도자석의 동작전류까지 전원전류  $I(t)$ 를 선형 증가한다. 필요로 하는 동작전류가 얻어지면 히터를 off하여 영구전류스위치를 초전도상태로 만든다. 그런 후, 전원전류를 일정한 감소율로 0A까지 감소시킨다. 이 때 자석의 동작전류는 일정하고 전원전류  $I(t)$ 는 영구전류스위치 쪽으로 이동된다. 이렇게 하여 초전도자석과 영구전류스위치 사이에 영구전류모드가 이루어진다.

그림 1과 같은 등가회로에서 초전도자석의 동작전류  $I_0(t)$ 가 시간에 따라 선형적으로 증가하도록 가변저항  $R(t)$ 를 조절하면, 양단전압  $V_L$ 는 일정하게 된다. 이 때 히터에 의하여 완전히 상전도상태가 된 영구전류스witch는 일정한 상전도저항  $R_s$ 를 갖는다고 할 수 있다. 따라서 영구전류스위치에 흐르는 전

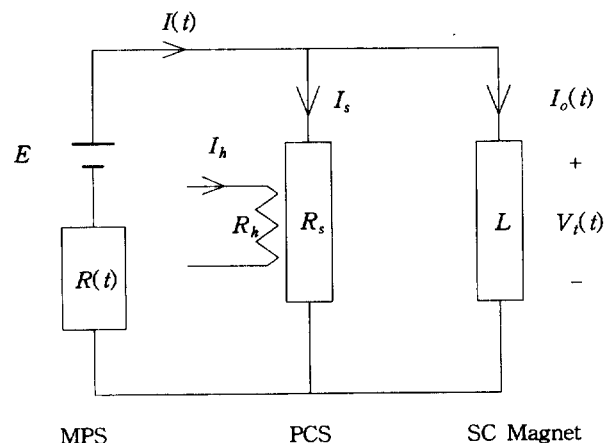


그림 1 영구전류스위치가 있는 초전도자석 시스템의 등가회로  
 Fig. 1 Equivalent circuit of superconducting magnet system with a PCS

\* 正會員 : 延世大 大學院 電氣工學科  
 \*\* 正會員 : 延世大 大學院 電氣工學科  
 \*\*\* 正會員 : 基礎電力工學共同研究所 委囑研究員  
 § 正會員 : 韓國電氣研究所 超傳導應用研究室 室長  
 §§ 正會員 : 延世大 工大 電氣工學科 副教授 · 工博  
 接受日字 : 1995年 3月 21日  
 1次 修正 : 1995年 6月 13日  
 2次 修正 : 1995年 9月 13日  
 3次 修正 : 1995年 11月 30日

류  $I_s$ 는 충전시작 시간  $t=0$ 일 때의 초기전류  $I_s(0)$ 의 값으로 일정하게 되고, 원하는 초전도자석의 동작전류까지 충전완료 순간의 가변저항을  $R(t)=R_1$ 이라 하면 다음과 같은 회로방정식을 세울 수 있다.

$E, L, R_s$  : Constants

$$V_t = L \frac{dI_o(t)}{dt} = I_s R_s \quad (1)$$

$$I(t) = I_s + I_o(t) \quad (2)$$

$$L \frac{dI_o(t)}{dt} + I(t)R_1 = E \quad (3)$$

단,  $L$  : 초전도자석의 인덕턴스

식 (1)~(3)의 연립미분방정식을 풀면, 충전완료 순간의 동작전류  $I_o(t)$  및 전원전류  $I(t)$  그리고 양단전압  $V_t(t)$ 를 차례로 얻을 수 있다.

$$I_o(t) = \frac{E}{R_1} - \frac{R_1 + R_s}{R_1} I_s(0) \exp\left\{-\frac{t}{\tau}\right\} \quad (4)$$

$$I(t) = \frac{E}{R_1} - \frac{R_s}{R_1} I_s(0) \exp\left\{-\frac{t}{\tau}\right\} \quad (5)$$

$$V_t(t) = I_s(0) R_s \exp\left\{-\frac{t}{\tau}\right\} \quad (6)$$

단,  $I_s(0)$ 는  $t=0$ 에서 영구전류스위치에 흐르는 전류

식 (4)~(6)에서 알 수 있듯이 초전도자석의 충전을 완료하는 순간의 과도특성을 살펴보면, 동작전류  $I_o(t)$ 와 전원전류  $I(t)$ 는 지수함수 형태로 증가하며 양단전압  $V_t(t)$ 는 지수함수 형태로 감소한다. 한편,  $I_o(t) \rightarrow E/R_1$ ,  $V_t \rightarrow 0$  으로 되면, 필요로 하는 자석의 동작전류를 얻는 충전 과정은 끝난다.

영구전류모드로 만들기 위하여 전원전류를 감소시키는 동안  $V_t=0$ 이므로 자석의 동작전류는  $I_o = E/R_1$ 로 일정하게 된다. 전원전류  $I(t) \rightarrow 0$  되는데 걸리는 시간을  $t_s$ 라 하면, 시스템의 각 파라미터는 시간에 따라 다음과 같다.

$$I_o = \frac{E}{R_1} : \text{Constant} \quad (7)$$

$$I(t) = \left(1 - \frac{t}{t_s}\right) \frac{E}{R_1} \quad (8)$$

$$I_s(t) = -\frac{t}{t_s} \frac{E}{R_1} \quad (9)$$

식 (8), (9)에서 전원전류가 시간에 따라 감소하면 영구전류 스위치의 동작전류는 증가함을 알 수 있다.  $t=t_s$  되는 순간 전원전류는 'off'되며, 다음 식에서 알 수 있듯이 영구전류스위치와 자석사이에 페루프가 형성되는 영구전류모드를 이루게 된다.

$$I_s(t_s) = -\frac{E}{R_1} = -I_o \quad (10)$$

이는 외부의 전원없이 초전도자석 시스템의 자체가 일정한 값을 갖고서 영구히 지속되는 것을 의미한다.

### 3. 영구전류스위치의 설계

영구전류모드에서 동작하는 초전도자석 시스템에서 영구전류스위치가 가져야 할 조건을 살펴보면, 먼저 시스템에서 필요로 하는 최대 동작전류를 흘릴 수 있어야 한다. 또한 영구전류모드에서 영구전류스위치만 켜치되어 상전도 상태로 될 경우 스위치가 과열되면 안된다[1]. 따라서 자석에 저장된 에너지를 견딜 수 있을 정도로 선재길이를 결정하며, 열손실을 최소화시킬 수 있는 권선 및 구조를 갖도록 하여야 한다. 초전도자석을 충전시 스위치에서 발생하는 에너지 손실을 줄이기 위해서는 스위치의 상전도저항  $R_s$ 가 가능하면 커야하며, 이 때 자체 교란을 최소화시킬 수 있도록 무유도성[5] 권선을 하여야 한다. 이러한 기본 조건들에 입각하여 아래와 같은 설계 조건식을 결정하였다.

#### 3.1 에너지 손실 조건에 따른 선재길이 결정

초전도자석에 원하는 동작전류를 얻기 위하여 충전 또는 방전시에 상전도상태인 영구전류스위치에서  $E_s$ 만큼 에너지손실이 발생한다. 따라서 원하는 에너지  $E_o$ 을 만들려면 DC 전원에서  $(E_o + E_s)$ 의 에너지를 공급해야 한다. 이 때의 에너지 손실비  $w[\%]$ 를 계산하면 다음과 같다[1].

$$w = \frac{E_s}{E_o} \times 100 = \frac{200L}{R_s t_{ramp}} \quad (11)$$

여기서  $t_{ramp}$ 는 초전도자석을 충전 또는 방전시키는데 걸리는 시간이다. 에너지 손실을 작게 하려면 식 (11)의 값이 작아야 한다. 초전도자석의 인덕턴스  $L$ 은 이미 정해져 있는 값이다. 그러므로 상전도저항  $R_s$  및 동작전류를 얻는 시간  $t_{ramp}$ 가 클수록 유리하다. 따라서 선재길이를 되도록 길게 하여  $R_s$ 를 크게 하며 전원전류 증감율을 작게 한다.

에너지 손실비를  $w\%$ 이하가 되도록 하려면, 식 (11)로 부터 다음과 같은 영구전류스위치 초전도선재의 길이 결정 조건식을 얻는다.

$$\therefore l_s \geq \frac{200L}{wt_{ramp}} \frac{A_s}{\rho_s} \quad (12)$$

여기서  $l_s$ 는 초전도선재의 길이,  $A_s$ 는 초전도선재의 단면적, 그리고  $\rho_s$ 는 초전도선재의 비저항이다.

#### 3.2 영구전류스위치 보호 조건에 따른 선재길이 결정

초전도자석 시스템을 영구전류모드에서 운전하다가 영구전류 스위치가 켜치되는 경우 초전도자석에 저장된 에너지는 켜치된 스위치의 상전도저항  $R_s$ 를 통하여 방출된다. 이 때 영구전류 위치의 온도는 4.2K에서 상당히 높은 온도인  $T_m$ 으로 상승할

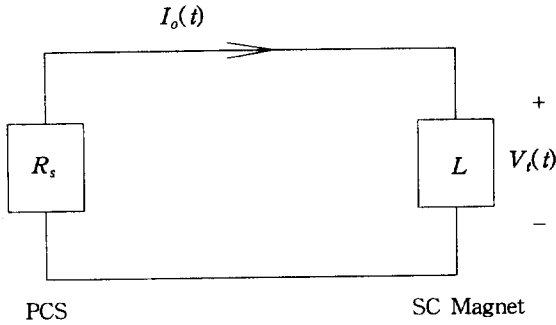


그림 2 영구전류스위치 켜치시 초전도자석 시스템의 등가회로  
 Fig. 2 Equivalent circuit of sc magnet system when a PCS is quenched

것이다. 이 것은 매우 짧은 시간에 이루어지므로 단열과정 (adiabatic process)이라고 볼 수 있으며, 그에 따라 영구전류스위치의 상전도저항  $R_s$ 는 일정하다고 할 수 있다. 그림 2와 같은 영구전류스위치가 켜치되었을 때의 등가회로에서 다음과 같은 식이 성립한다.

$$\frac{LI_o^2}{2} = \int_0^t I_o^2(t) R_s dt = A_s I_s \Delta U \quad (13)$$

여기서,  $\Delta U$ 는 초전도선재의 내부에너지 변화량으로서 모든 금속에 대하여 다음 식과 같이 주어진다[4].

$$\Delta U = \int_{4.2}^{T_m} C_v dT \quad (14)$$

단,  $C_v$  : 초전도선재의 정적비열,  $T_m$  : 켜치시 선재의 상승온도  
 식 (13)의 왼쪽 항은 초전도자석에 저장되어 있던 에너지이고, 가운데 항은 영구전류스위치의 상전도저항에 의한 발열을 의미하며, 오른쪽 항은 영구전류스위치를 4.2K에서  $T_m$ 이라는 온도까지 높이는데 필요한 열량을 의미한다.

영구전류스위치를 설계·제작시 초전도선재의 길이를 충분히 고려하지 않는다면, 상전도저항에서의 발열로 인하여 영구전류스위치는 타버리게 될 것이다. 따라서 식 (13)과 같은 조건은 영구전류스위치를 설계시 중요한 파라미터가 된다. 식 (13)으로부터 영구전류스위치가 켜치되었을 경우 이를 보호할 수 있는 충분한 초전도선재의 길이에 대한 조건식을 나타내면 다음과 같다.

$$\therefore l_s = \frac{LI_o^2}{2A_s I_s \Delta U} \quad (15)$$

실제 초전도선재의 길이는 초전도자석에서의 에너지 방출을 감당할 수 있도록 식 (15)에서 얻어진 길이 이상이 되어야 한다. 이상과 같은 선재길이 결정 조건식들을 이용하여 영구전류스위치의 초전도선재 길이를 결정할 때 식 (12)와 식 (15)를 모두 만족하도록 해야 한다.

### 3.3 영구전류스위치의 히터선재 길이 결정

그림 1의 등가회로를 보면, 영구전류스위치는 히터전류  $I_h$ 와

히터저항  $R_h$ 에 의하여 초전도-상전도 전이에 의한 스위칭 동작을 하게 된다. 따라서 히터는 영구전류스위치를 빠른 시간에 상전도로 전이시킬 수 있는 에너지를 발생시켜야 한다. 또한 영구전류스위치는 초전도 상태로의 회복도 가능하면 빠르게 되어야 한다.

초전도자석에 충전 또는 방전을 위하여, 히터에 의하여 상전도상태가 된 영구전류스위치의 온도는 4.2K에서 임계온도인  $T_c$  이상까지 상승할 것이다. 이 때의 에너지 관계식은 다음과 같다.

$$\int_0^t I_h^2 R_h dt = A_s I_s Q_o \quad (16)$$

$$\text{단, } Q_o = \int_{4.2}^{T_c} C_v dT \quad (17)$$

식 (16)의 왼쪽 항은 히터에 의하여 생성되는 에너지이고, 오른쪽 항은 영구전류스위치를 4.2K에서 임계온도  $T_c$ 까지 높이는데 필요한 열량을 의미한다. 식 (16)에서 히터저항과 히터전류는 일정한 값이므로, 필요한 히터선재의 길이를 결정하는 조건식은 다음과 같이 표현된다.

$$\therefore l_h = \frac{A_h}{\rho_h} \frac{A_s I_s Q_o}{I_h^2 t} \quad (18)$$

여기서  $l_h$ 는 히터선재의 길이,  $A_s$ 는 히터선재의 단면적,  $\rho_h$ 는 히터선재의 비저항, 그리고  $t$ 는 히터가 동작한 시간이다. 영구전류스위치 히터선의 재료가 결정되면 필요한 열량  $Q_o$ 에 맞도록 식 (18)로부터 히터선재의 길이를 구할 수 있다.

한편, 이러한 과정은 긴 충·방전 시간동안 유지되어야 하므로 완전한 단열과정으로 볼 수 없으므로 외부로 빼앗기는 에너지도 고려해야 한다. 또한 임계온도보다 약간 높은 온도에서 영구전류스위치가 안정된 상전도상태를 유지하도록 하며, 빠른 스위칭 동작을 할 수 있는 에너지를 만들기 위해서는 위에서 계산한 값보다 더 많은 열량을 필요로 할 것이다. 따라서 예비 실험을 통하여 아래와 같은 식을 기준으로 하여 필요한 상수값을 찾도록 한다.

$$l_h = h \frac{A_h}{\rho_h} \frac{A_s I_s Q_o}{I_h^2 t} \quad (19)$$

단,  $h$ 는 비례상수

### 3.4 영구전류스위치 보빈의 형태 결정

선재길이 결정식에서 결정된 길이 만큼의 초전도선재를 가지 고서 PCS 보빈에 권선을 하기 위해서는 보빈 크기가 결정되어야 한다. 만일 PCS가 인덕턴스 성분을 가지고 있다면, 영구전류모드를 만들기 위하여 전류를 PCS로 인가시킬 때 유도전류에 의한 자계교란이 발생할 수 있고, 이에 따라 영구전류모드를 이루기가 불가능하다. 따라서 PCS의 권선은, 자계교란이 최소가 되는, 무유도성(non-inductive)의 권선 형태를 갖도록 한다. 본 연구에서는 그림 3과 같이 2층의 무유도성 권선 형태를 갖는 PCS를 기준으로 보빈 설계를 한다. 여기서, 권선내측반지

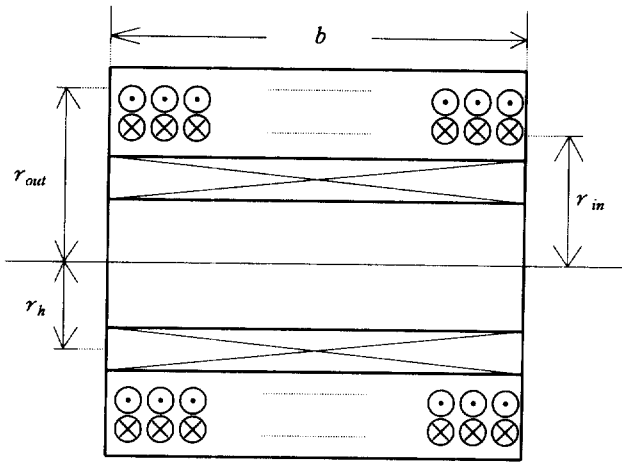


그림 3 영구전류스위치 보빈의 설계 파라미터  
Fig. 3 The design parameters of PCS bobbin

를  $r_{in}$ , 권선의외측반지름  $r_{out}$ , 보빈길이  $b$ , 그리고 히터권선반지름  $r_h$ 라 한다. 앞에서 결정된 선재길이를 기준으로 하고,  $r_{in}$ ,  $r_{out}$ ,  $b$ 의 범위를 주고서, PCS의 인덕턴스 값  $L_s$ 를 계산한다. 여기서 인덕턴스 계산식은 동심·동축 코일의 인덕턴스를 구하는 Nagaoka 공식[5]을 이용하였다. 또한, 내측권선수  $N_{in}$ 과 외측권선수  $N_{out}$ 이 같도록 권선한다. 이러한 조건하에 각 파라미터의 변화에 따라 인덕턴스값이  $L_s \approx 0$  되는 무유도성 PCS의 적당한 데이터를 찾는다. 그림 3에서 보빈형태 결정 시 사용되는 식들은 다음과 같다.

$$r_{out} = r_{in} + 2a_s \quad (20)$$

$$N_{in} = N_{out} = \frac{l_s}{2\pi(r_{in} + r_{out})} = \frac{l_s}{4\pi(r_{in} + a_s)} \quad (21)$$

$$b = 2a_s \times N_{in} \quad (22)$$

$$\therefore L_s = L_{in} + L_{out} - 2M_s \rightarrow 0 \quad (23)$$

#### 4. 영구전류스위치의 제작·실험 및 결과고찰

본 연구에서는 설계에 의한 데이터를 기준으로 영구전류스위치를 시험 제작하였다. 영구전류스위치를 제작하는데 사용된 초전도선재의 제원은 표 1에 있다. 그림 4는 제작된 영구전류스위치이며, 이에 대한 각 파라미터의 값들은 표 2에 있다. 영구전류스위치 보빈의 재질은 베이크라이트(bakelite)로 했다. 그리고 히터에 의한 온도를 측정할 수 있도록 열전대(TC-wire)를 히터와 초전도선재 사이에 위치 시켰다. 히터의 소비전력을 작게 하려면 히터를 액체헬륨과 단열 시켜야 하므로 보빈의 가장 안쪽에 권선하였으며, 또한 스위칭타임을 짧게 하기 위해서 보빈전체에 고르게 감았다. 초전도 권선은 스위치가 off→on로 바뀔 때는 헬륨과, on→off로 바뀔 때는 히터와 열 교환이 잘 이루어져야 하므로 최외각에 두었다. 또한 원활한 열 교환을 위하여 저온용 열전도 그리스를 사용하였으며, 권선을 끝낸 영구전류스위치는 최종적으로 에폭시수지로 함침시켰다. 한편,

시스템 조립시 초전도자석과 영구전류스위치의 접합부는 1m정도 길이의 선재를 서로 꼬아서 저온용납으로 납땜하여 접합부 저항 값을 줄일 수 있도록 하였다[6].

영구전류모드를 만드는 과정을 반복하면서, 먼저 영구전류스위치가 액체헬륨 내에서 on→off 스위칭 동작을 하는지 확인한 다음, 영구전류스위치를 off 시켰을 때 필요로 하는 동작전류까지 초전도자석이 충전될 수 있으며, 또한 영구전류모드가 되는 것을 확인하였다. 마지막으로 액체헬륨이 남아있는 동안 영구전류모드에서 동작전류  $I_o$ 를 측정하여 전류감소율을 알아보았다.

설계조건에 따라 제작 조립된 초전도자석 시스템에서 영구전류스위치는 안정적으로 스위칭 동작을 하였다. 또한 40A 및 60A 등 원하는 동작전류를 충전시킬 수 있었으며 영구전류모드가 되는 것을 확인할 수 있었다. 그림 5는 40A의 동작전류를 갖는 영구전류모드가 안정적으로 만들어졌음을 알 수 있다. 그림에서 온도변화를 보면 히터 'on' 상태에서 약 17K이며 히터 'off' 상태에서 4.2K로서 초전도-상전도의 전이가 msec 단위의 빠른 시간 내에 이루어짐을 알 수 있었다. 사용한 히터전류는 200mA 였으며 히터 'on' 상태에서 양단전압이 발생하는데 순간적으로 100~200mV까지 상승하여 서서히 안정되면서 계산치 ( $V_i = L \frac{dI_o}{dt} = 0.1H \times 0.5A/sec$ )와 같은 약 50mV 정도로 되었다.

그림 6은 동작전류 60A인 영구전류모드에서 영구전류스위치를 켜지 시킨 실험에 대한 결과이다. 영구전류모드를 이루어가는 동안 DC 전원의 전류가 급격히 증가하는 부분에서 자석의 인덕턴스에 의해 동작전류는 10sec 정도 후에 전원 전류와 같아짐을 보이고 있다. 따라서 영구전류스위치의 상전도 저항

표 1 사용된 초전도선재의 제원

Table 1 Specification of the superconductor for the PCS

선재 종류		NbTi/Cu
임계 온도	K	9.3
임계 전류	A	80 (@1T, 4.2K)
필라멘트 수	본	24
필라멘트 지름	μm	32
선재 지름	mm	0.45
비저항	nΩcm	35
절연두께	μm	25
Twist Pitch	mm	20
NbTi/Cu		1/7

표 2 제작된 영구전류스위치의 각 파라미터

Table 2 The main parameters of the constructed PCS

내측 지름	mm	28
외측 지름	mm	29
보빈 길이	mm	30
권선수	turn/층	58
층수	층	2
인덕턴스	μH	5.3
선재 길이	m	11
켄치 저항	mΩ	20
히터 지름	mm	26
히터 권선수	turn	37
히터선재 길이	m	3
히터 저항	mΩ	100

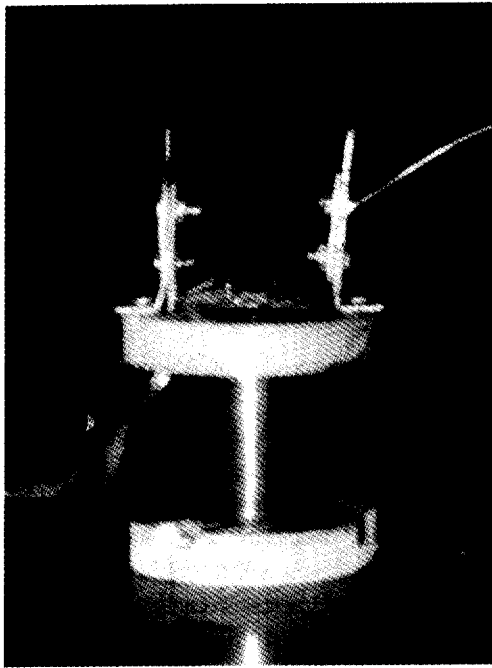


그림 4 제작된 영구전류스위치  
Fig. 4 The constructed PCS

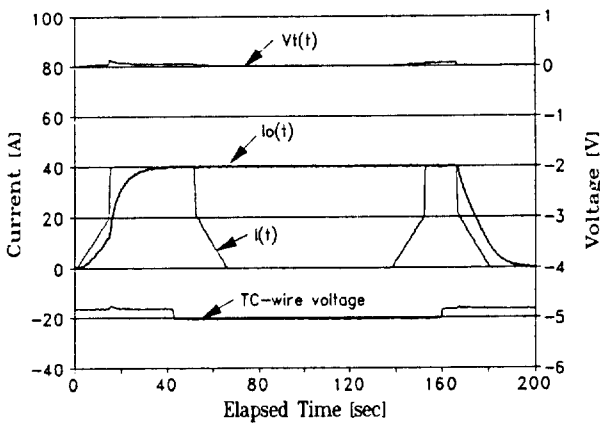


그림 5 40A의 영구전류모드에서 각 파라미터  
Fig. 5 Parameters in the persistent mode of 40A

값을 크게 할수록 보다 응답속도가 빠르다는 사실을 입증하고 있다. 계산에 의한 시정수와 비교하면 2배 정도 느린 회복속도를 보이고 있다. 한편, 온도변화를 보면 전원전류가 급격히 증가하는 시점에서 영구전류스위치의 온도가 순간적으로 3-4K 정도 상승을 하고 있다. 양단전압 또한 갑자기 증가하는 모습을 보였다.

그림 7은 60A의 영구전류모드에서 켄치 직후의 각 파라미터의 변화를 보이고 있는데, 동작전류는 1.5sec만에 0A로 되었다. 켄치 발생후 0.5sec 만에 온도는 약 70K 까지 상승했는데, 이는 영구전류스위치의 상전도저항에서 발생한 에너지 때문이다.

이후 온도는 점점 낮아져서, 동작전류가 완전히 0A로 되어서 5sec 정도 경과된 후에 4.2K 이하가 되었다. 즉, 초전도상태로의 회복 시간은 5sec 이상이 소요되고 있다. 켄치 발생시 양단전압은 3.6V 까지 상승하여 약 1.5sec 후에 0V가 되고 있다.

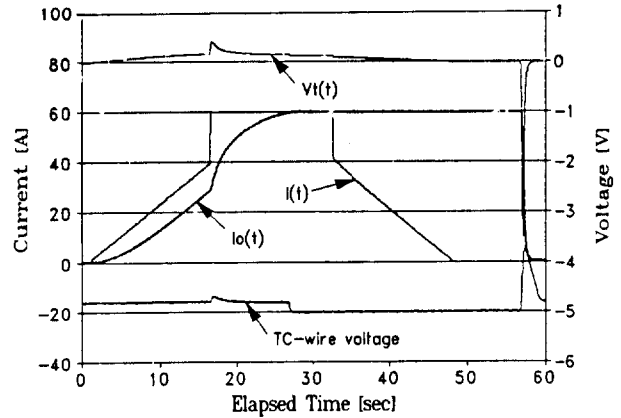


그림 6 60A의 영구전류에서 스위치 켄치시 각 파라미터  
Fig. 6 Parameters when the PCS is quenched at the persistent current of 60A

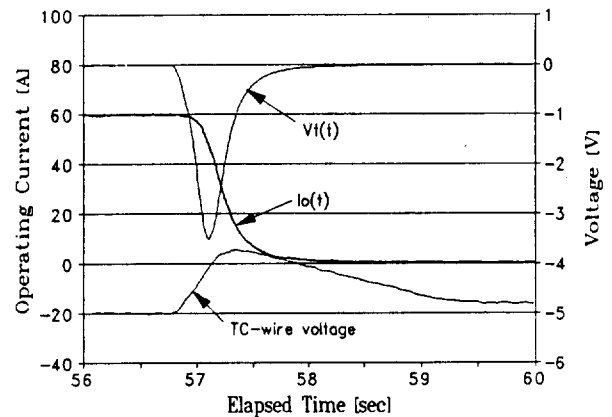


그림 7 켄치 직후의 각 파라미터  
Fig. 7 Parameters right after the PCS is quenched

표 3 60A의 영구전류모드에서 시간에 따른 전류감소  
Table 3 The current decay w.r.t. time in the persistent mode of 60A

시간 (분)	$(I-I_0)/I_0 \times 100$ (%)
0	0
8	-0.04
15	-2.27
20	-2.45
25	-2.56
35	-2.27
37	-3.18
38	-3.73
52	-3.73
60	-3.55

자석의 인덕턴스  $L = 100\text{mH}$ , 스위치의 상전도저항  $R_s = 20\text{m}\Omega$ 에 따른 계산에 의한 시정수(5sec) 보다 빠른 시정수를 갖는 이유는 히터열에 의한 온도상승보다 자석 에너지에 의한 열이 훨씬 커서 온도상승이 70K 까지 됨으로서 상전도저항 값이 몇 배 증가하였기 때문이다.

60A의 영구전류모드에서 전류감소를 측정 실험결과를 표 3

에 나타나 있다. 측정시간은 60분 동안이었다. 영구전류모드에서 전류는 10분 정도는 매우 안정적인 모습을 보이며 감소 정도가 거의 없는 0.04% 였다. 60분후 3.55%의 감소율을 보이고 있으며 비교적 안정적으로 감소하는 형태의 데이터를 보이고 있다. 이러한 감소율은 주로 초전도-상전도 및 초전도-초전도 접합부저항에 의한 것으로 보인다.

### 5. 결 론

초전도자석을 응용한 시스템에서 영구전류모드 운전을 위해 사용되는 일반적인 영구전류스위치의 충·방전 모드의 특성을 해석하였고, 설계 조건에 따라 무유도성 권선법에 의해 스위치 인덕턴스 값이 거의 없는 설계 파라미터를 도출하였다. 또한 제작된 영구전류스위치를 가지고 특성 실험을 한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 안정적으로 on-off 스위칭 동작을 하여 40A 및 60A의 동작전류를 초전도자석에 충전시켜 영구전류모드를 만드는 데 성공하였다.

(2) 동작전류를 손실없이 얻기 위해서는 스위치의 상전도저항이 클수록 좋으며 전류중감율을 작게 하여야 한다.

(3) 히터의 on-off에 따른 영구전류스위치의 스위칭 시간은 msec 단위로 매우 빠른 초전도-상전도 전이를 보였다.

(4) 60A의 영구전류모드 운전시 퀵치 발생에 의한 온도상승은 최고 70K 정도였으며 초전도상태로의 회복시간은 5초 이상 걸렸다.

(5) 영구전류모드에서 전류감소율은 10분 이내에는 매우 양호한 상태였으며 60분후 3.55%의 감소율을 보였다.

(6) 접합부저항 문제를 해결할 경우 더욱 양호한 전류감소율을 갖는 영구전류스위치를 개발할 수 있을 것으로 사료된다.

본 연구는 한국전기연구소의 지원에 의하여 수행된 것이며, 이에 감사드립니다.

### 참 고 문 헌

- [1] M. N. Wilson, Superconducting Magnets, Clarendon Press, Oxford, 1983
- [2] S. Yamamoto and T. Yamada, "Initial magnetic field decay of the superconducting magnet in persistent current mode", IEEE Trans. on magn., vol.24, pp1292-1294, 1988
- [3] H. Maeda, et al., "Instability of persistent current switch", IEEE Trans. on magn., vol.27, pp2124-2129, 1991
- [4] G. K. White, Experimental Techniques in Low Temperature Physics, Clarendon Press, Oxford, 3rd-Ed., 1979
- [5] F. W. Grover, Inductance Calculations, D. Van Nostrand, NewYork, 1947
- [6] M. H. Lin, X. T. Zhou, "Superconducting switches and joints in 1-T whole body MRI magnets", Cryogenics, vol.30, pp626-629, 1990

## 저 자 소 개

### 오 윤 상 (吳 潤 相)

전기학회 논문지 제45권 제1호 참조

### 이 상 진 (李 相 鎭)

전기학회 논문지 제45권 제1호 참조



### 최 경 달 (崔 景 達)

1962년 2월 12일생. 1984년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1986년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 기초전력공학공동연구소 연구원

### 유 강 식 (柳 康 植)

전기학회 논문지 제45권 제1호 참조

### 고 태 국 (高 太 國)

전기학회 논문지 제45권 제1호 참조