

## 초전도 마그네트용 영구전류스위치의 제작 및 성능 평가

고락길, 배준한, 심기덕, 이연용, 권영길, 류강식  
한국전기연구원 초전도응용연구그룹

### Fabrication and performance test of persistent current switch for superconducting magnet

Rockkil Ko, Joonhan Bae, Kideok Sim, Eonyong Lee, Youngkil Kwon, Kangsik Ryu  
Applied superconductivity research group in Korea Electrotechnology Research Institute

rkko@keri.re.kr

**Abstract** - In order to design thermally trigger controlled persistent current switch (PCS) for superconducting magnet system, it is very important to know information of applied adiabatic method and condition to get designed resistance and characteristics. In this paper, we used cotton-gummed tape as thermal insulator and derived experimentally averaged thermal conductivity of it around 10K on the assumption that adiabatic structure of PCS is shape of pipe. The result value is about 0.29 W/mK and it is verified reasonable value by computer simulation and experiment of test PCS. Test PCS was designed and manufactured different dimensions. The experimental results of test PCS were in good agreement with the calculated results.

## 1. 서 론

초전도 기술의 대표적인 특징 중에 하나인 초전도영구전류운전은 극저온 환경에서 전기적인 저항이 영이 되는 초전도 상태인 도체에 높은 전류를 손실 없이 연속적으로 통전시킬 수 있다는 특징을 이용하는 것으로 외부로부터 한번의 충전으로 일정기간동안 원하는 자장 에너지를 얻을 수 있는 상태를 말한다. 특히 MRI, NMR SMES, MAGLEV 등과 같은 초전도 마그네트 시스템에서는 한번 충전 후 외부로부터의 전원 장치와 완전히 분리시켜 초전도영구전류상태로 운전시킨다. 이때 충전 상태의 운전에서 초전도영구전류운전 상태로 초전도 마그네트시스템을 전환시켜주는 역할을 하는 것이 초전도영구전류스위치(PCS; Persistent Current Switch) 일반적으로 PCS는 비자성체의 보빈에 초전도선

재와 히터를 솔레노이드 형태로 권선하고 이를 외부의 극저온 환경으로부터 단열되게 구성된다. PCS는 히터 열에 의해 제어되기 때문에 초전도 마그네트시스템을 충전 및 방전시키는 동안 설계된 저항을 최소의 히터 전류로 동작시키는 것이 중요하다.

본 연구에서는 솔레노이드형 PCS의 단열부의 형태를 제한된 길이를 갖는 파이프 상태로 가정하고, 단열재로 천 테이프의 열전도율을 실험 데이터로부터 계산하였다. 그 열전도율을 가지고 설계된 PCS의 성능을 테스트 PCS의 실험에 의해 수행하고, 그 실험 결과를 계산된 결과와 비교하였다.

## 2. 본 론

### 2.1 PCS 구조

본 연구에서 적용한 PCS의 기본적인 단열구조는 Fig.1.과 같다. FRP bobbin 위에 상전도 저항 값을 높게 하기 위해 비저항이 큰 CuNi을 안정화재로 사용한 NbTi 초전도선재로 권선했다. 일반적으로 전류의 방향이 서로 반대가 되어 흐르도록 선재를 bifilar 방법으로 권선하여 인덕턴스가 최소가 되는 무유도 권선을 함으로써 자계의 교란을 최소화시키게 된다. 초전도 권선과 함께 히터선의 권선도 함께 이루어지게 되며, 이때 히터의 발열은 초전도 권선부를 거쳐 그 외층의 단열부까지 전달된다. Fig.1.에서 R0는 권선되어지는 보빈의 반경이고, R1과 R2는 보빈의 중심으로부터 단열부의 안쪽 반경과 바깥쪽 반경을 나타낸다. L은 단열부의 길이를 나타내고,  $\Delta Q$ 는 히터에 의한 발열을,  $\Delta T$ 는 PCS의 중심부 온도와 단열부 바깥쪽 온도차를 나타내며 CGR1-CGR3로부터 측정된다. 히터에 의한 발열은 "영"부터 시작하므로  $\Delta Q = I_h^2 R_h$ 라 할 수 있다. 여기서  $I_h$ 는 히터 전류이고,  $R_h$ 는 히터 저항이다. 그러므로 단열부의 형태를 파이프 상

태로 가정하고 푸리에 법칙을 적용하면 단열부의 열전도율  $\lambda$ 를 다음과 같이 근사화 시킬 수 있다.

$$\lambda \approx -\frac{I_h^2 R_h}{2\pi L \Delta T} \ln\left(\frac{R1}{R2}\right) \quad (1)$$

본 연구에서는 1W이하의 히터 파워를 사용하며, PCS의 초전도 선재가 10K에서 갖는 저항값을 기준으로 단열 설계가 되는 것이 목표이다. 이는 PCS의 단열에 의해 단열부 바깥쪽은 액체 헬륨온도인 4.2K를 거의 유지하고 내부의 초전도 권선부에서는 10K를 유지하는 것을 개발 목표로 하는 것이다. 그러므로  $\Delta T$ 의 기준은 10-4.2 5.8K이 된다. 본 연구에서는 온도 센서의 측정 오차를 고려하여 6.0K를 사용하였다.

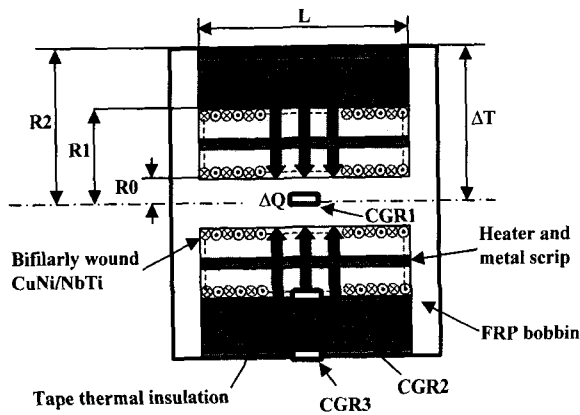


Fig.1. The schematic picture of thermally controlled switch.

## 2.2 PCS 제작

모두 5개의 PCS를 제작하였으며, 그 중 하나에 실험을 위해 Fig.1.과 같이 FRP 보빈 중심(CGR1)과, 단열부 안쪽(CGR2)과 바깥쪽(CGR3)에 각각 극저온 온도 센서인 CGR 센서를 부착하였다. 각 PCS에 대한 제작 파라미터는 Table.1.1에서 알 수 있다. 초전도 권선의 중간 층 사이에 중심에서 대칭이 되게 히터를 촘촘히 권선 했으며, 히터에 의한 열전달을 높이기 위해 금속 조각으로 알루미늄 테이프를 한 층 깔고 권선 했다.

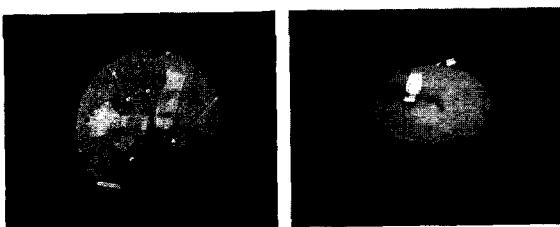


Fig.2. The manufactured PCS1

본 연구에서는 PCS의 단열을 위해 일반적으로 전기절연용으로 사용하는 고무 성분을 포함하고 있는 천 테이프를 설계 수치만큼 권선 하였으며, 이를 극저온 에폭시인 stycast로 고정하였다. 이 방법은 PCS의 초전도 권선 작업 후 연속적으로 단열 작업이 가능하여 제작의 편의성을 제공하고 제작 시간을 단축시키는 장점을 갖는다.

## 2.3 실험 방법

CGR 센서가 내장된 PCS1에 히터 전류를 변화시키면서 PCS 양단에 전류 100mA를 흘리며 4단자법으로 양단전압을 측정하여 히터 전류에 의한 PCS의 저항 변화를 측정하였다. PCS의 운전은 정해진 히터 저항에 전류를 변화시켜서 히터 열량을 변화시키게 되므로 히터 열량과 저항의 관계를 측정하는 것 보다 히터 전류와 저항과의 관계를 측정하는 것이 유리하다. 실제로 PCS의 히터 전류 또는 히터 열량과 저항 관계는 PCS의 단열 조건에 의해 열평형이 이루어지는 저항값에서 포화되게 되므로 포화저항 도달 이후의 더 높은 히터 전류는 포화시간을 단축시키고 열적 손실을 증가시킬 뿐이다. 그러므로 포화저항에 이르는 가장 낮은 히터 전류를 선택하는 것이 유리하다. 또한 히터 전류를 적게 사용하면 그만큼 PCS의 회복 속도 또한 빠르게 된다.

PCS1의 데이터로부터 식(1)을 이용하여 천 테이프를 이용한 단열 방법에 대한 수용 가능한 열전도율인  $\lambda$ 의 유도가 가능하다. 유도한  $\lambda$ 를 이용하여 다른 테스트 PCS2~5의 측정결과와 비교하여 그 타당성을 검증했다.

## 2.4 실험 결과 및 논의

히터 전류를 인가한 후 PCS의 내부 온도 곡선은 처음에 급격히 증가하다가 점점 어느 온도 이상에서는 그 증가가 매우 둔화되면서 포화되는 양상을 보인다. 이는 포화되는 시점에서 PCS의 내부와 외부 사이의 열적 평형 상태가 도달됨을 의미한다. 온도 상승으로 인해 PCS의 저항 또한 포화되는데, 온도의 경우 온도 상승 기울기가 완만해지면서 완전 포화까지 오랜 시간이 소요되지만, 상대적으로 저항의 포화는 빨리 이루어진다. 본 실험에서는 전류에 따라 PCS의 저항 증가 기울기가 급격히 감소할 때와 시간을 두고 PCS의 온도가 포화되어 최고 온도를 가질 때의 PCS 온도차와 저항을 각각 측정하여 Fig.3.에 나타내었다. 측정된  $\Delta T$ 를 식(1)에 대입시켜 각 히터전류에 대한 열전도율을 구하고 이를 fitting 하여 PCS1에 대한 실제적인 곡선을 Fig.3.에 나타내었다. 여기서 두 곡선은 비선형적인 열관계를 나타내는 실제적인 곡선으로, 일정 온도 영역 내에서 수용 가능한 선형 단순화 관계를 유도함에 있어서 이 두 곡선은 경계값으로 생각할 수 있으므로 두 곡선 사이에서 계산된

열전도율  $\lambda$ 는 신뢰할 수 있을 것이다.

본 연구에서 실험을 통해 얻은 천 테이프를 이용한 단일재의 열전도율은  $\lambda=0.29 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ 이다. 이를 제작 파라미터가 다른 테스트 PCS에 적용하여 확인한 결과, 실험을 통해 얻은 열전도율을 적용해 계산된  $\Delta T=6$ 일 때의 히터 전류가 실제 제작된 PCS의 10K일 때 갖는 설계 저항값에 대해 모두 97%이상을 나타내었다.

이를 Table.1.과 Fig.4.에 나타내었으며, Fig.4.에서 점선의 곡선은 인가된 히터 전류인  $I_h$ 에 따른 PCS의 포화 곡선이고, 실선의 곡선은 계산에 의한  $\Delta T$ 의 예측 곡선이다. 화살표는  $\Delta T=6$ 에서 예측 곡선의 히터 전류와 이때의 포화 저항을 알려주며, 그 값이 매우 신뢰할 수 있음을 확인하였다. 여기서 Table.1.의  $R_s$ 는 PCS의 포화저항이다.

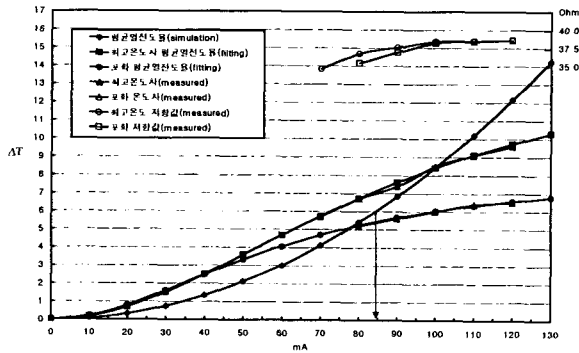


Fig.3.  $\Delta T$  and normal state resistance vs. constant heater current of PCS1

Table 1. Parameters fabricated really of PCS and comparison of designed resistance and measured resistance.

	R1 [mm]	R2 [mm]	L [mm]	Rh [ $\Omega$ ]	Ih [mA]	Rs[ $\Omega$ ]	
						설계값	측정값
PCS1	34	62	40	102.4	84	37.8	37 (98%)
PCS2	17	23	10	46.8	88	0.76	0.74 (97%)
PCS3	17	23	10	44.1	91	0.76	0.74 (97%)
PCS4	17	23	10	38.1	97	0.76	0.74 (97%)
PCS5	17	23	14	38.5	115	1.06	1.03 (97%)

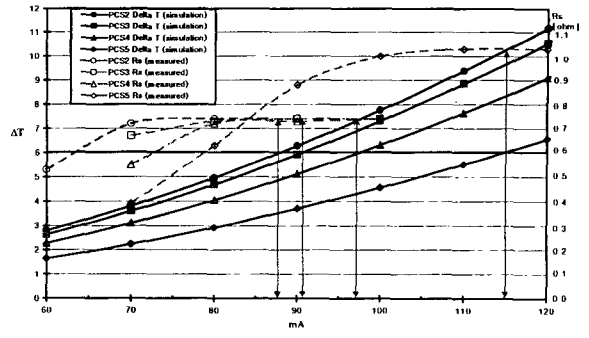


Fig.4. Normal state resistance vs. constant heater current of test PCSs. It indicates the minimum heat current to get saturated resistance for each switch.

PCS의 기본적인 기능은 스위치의 on/off를 완벽하게 수행하는 것이다. 스위치 성능을 평가하기 위해 본 연구에서는 Fig.5.와 같이 PCS의 동작 과정을 세 부분으로 나누었다.

퀀치 시간은 히터 전류가 켜지고 나서 스위치의 저항이 나타나는데 필요한 시간이다. 포화시간은 저항이 포화되는데 걸리는 시간이다. 퀀치 시간과는 반대 개념으로 회복 시간은 히터 전류가 off 된 후 저항이 "0"이 되는데 필요한 시간이다. 이상적인 스위치 특성은 포화시간과 회복시간이 같은 경우로 이등변삼각형 모양의 그래프를 나타낸다.

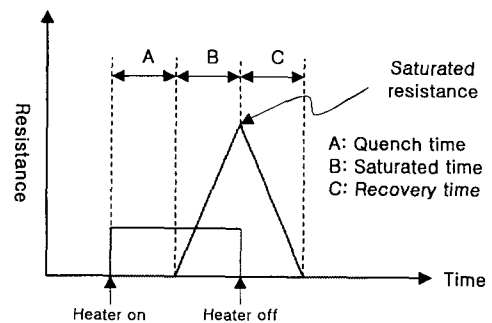


Fig.5. Operating procedure of switch.

Fig.6.과 Fig.7.은 PCS1과 PCS4에 대한 스위치 성능을 나타낸다. PCS1의 이상적인 경우는 히터 전류가 100mA일 때로 포화시간은 74.8초이고, 회복시간은 84.1초이다. 그러나 MRI와 NMR용 마그네트 시스템의 경우 여자시간이 길므로, 이 경우 포화시간보다 회복시간을 줄이는 것이 유리하다. 그러므로 MRI와 NMR 시스템에서 PCS1의 동작은 80mA에서 90mA 히터 전류를 선택하는 것이 유리하다.

실험 스위치에 대해서 PCS4의 이상적인 히터 전류는 100mA로 포화시간은 6.3초이고 회복시간은 5.5초이다.

### 3. 결 론

PCS의 단열 구조를 파이프로 가정함으로써 얻은 실험적인 열전도율이 타당함을 확인하였다.

PCS용 단열물질로써 천 테이프를 사용하기 위해 계산된 열전도율은  $0.29 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ 이고, 이 값을 이용하여 PCS를 설계 및 제작하였다. 검증 을 위한 실험 결과는 설계 결과와 매우 잘 일치 하였다. 또한 천 테이프를 이용한 단열 방법은 제작 시간을 줄일 수 있는 장점을 갖는다.

10K 부분에서 실험적으로 계산된 열전도율을 이용한 PCS의 설계는 설계된 저항을 얻기 위한 최소 히터 전류와 스위치의 크기에 대한 파라미터를 제공한다. 최소 히터 전류로 PCS 운전은 최소 열손실과 빠른 회복 시간의 장점을 갖는다.

또한 본 연구에서 제시한 단열구조 설계 방법은 PCS용 단열재로 임의의 어떠한 물질을 사용 하더라도 자연스럽게 최소 히터 전류를 갖는 PCS의 특성을 갖게 설계가 가능하다.

#### 감사의 글

본 연구는 보건복지부에서 시행한 선도기술· 의료공학 기술개발 사업(HMP-98-G-1-015)에 의하여 지원되었으며, 이에 감사 드립니다.

#### [참 고 문 헌]

- [1] 澁谷 和幸, “無冷媒 マグネットの NbTi 超傳導 永久電流運轉”, 低溫工學, Vol.32, No.10, pp499-506, 1997
- [2] 한국전기연구소, 보건복지부, “G7의료공학 연구개발사업 고자장 자기공명영상 장치 및 초전도 자석 개발(2차 년도 연차실적·계획서)”, 1999
- [3] 고락길, “핵자기공명 마그네트용 알루미늄 보빈 영구전류스위치”, 한국초전도·저온공학회, 한국초전도·저온공학회 학술대회 논문집, 제1권 1호, pp138-141, 1999.1
- [4] Salasoo, “Superconducting switch”, US Patent 5512870, 1996
- [5] Peak, “Persistent protective switch for supercon-ductive magnets”, US Patent 5361055, 1994
- [6] G. B. J. Mulder, D. ter Avest, H. H. J. tem Kate, H. J. G. Krooshoop and L. J. M. Vande Klundert, “Experimental controlled superconducting switches for high frequency operation”, *IEEE Trans. Magn.*, Vol.32, No.2, pp.907-910, March 1988

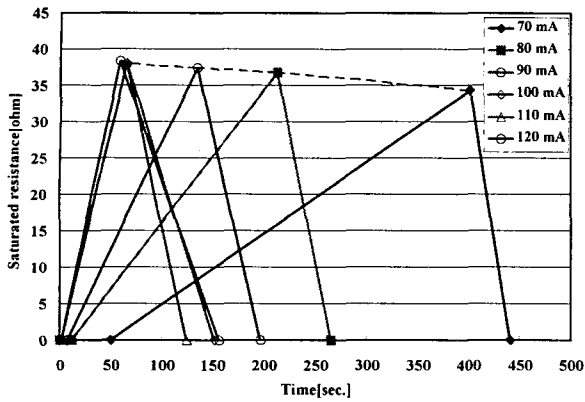


Fig.6. Switching performance of PCS1.

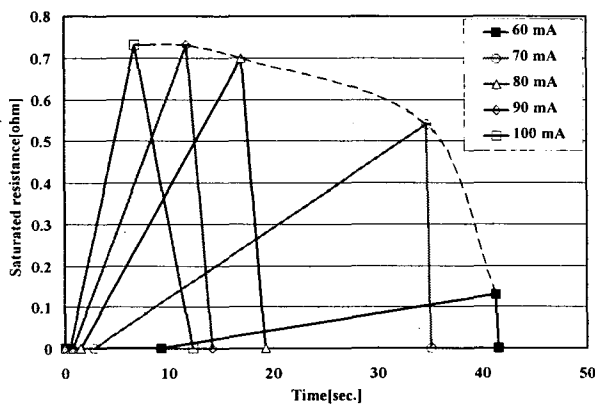


Fig.7. Switching performance of PCS4.

위의 실험 결과를 통해 PCS1의 단열 조건에서는 약 84mA의 히터 전류로 효율적인 PCS1의 운전이 가능함을 확인하였으므로 1히터 전류 80mA로 영구전류실험을 하였다. 250A의 운전 전류를 1A/sec.의 속도로 충전시킨 후 히터 전류를 차단하였을 때, 실험용 소형 초전도 마그네트의 자장을 측정하는 홀 센서가 일정한 자장을 유지함으로써 초전도영구전류 상태로 진입하여 운전되는 것을 확인하였다.

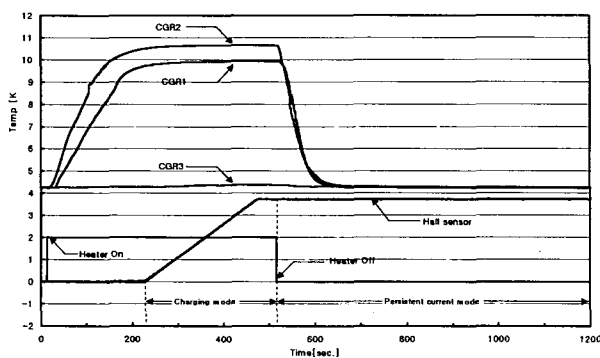


Fig.8. Operating persistent current mode with PCS1. Heater current was 80mA, operating current 250A and ramping rate 1A/sec.