

# Bi-2223 고온 초전도 코일의 영구전류 운전특성 실험

최세용, 나완수, 김정호\*, 주진호\*, 하홍수\*\*, 오상수\*\*  
성균관대학교 전기전자 컴퓨터공학부, \*성균관대학교 금속재료 공학부  
\*\*한국전기연구원 초전도 응용 연구그룹

## The Experiment of the persistent current operation characteristics using Bi-2223 HTS coil

Sevyong Choji, Wansoo Nah, Jung Ho Kim\*, Jinho Joo\*  
Hong-Soo Ha\*\*, Sang-Soo Oh\*\*

School of Electrical and Computer Eng. , SungKyunKwan Univ.  
\*School of Metallurgical and Materials Eng. , SungKyunKwan Univ.  
\*\*Applied superconductivity Lab, KERI

conny1@nature.skku.ac.kr

**Abstract** - In this paper, we fabricated a persistent current mode magnet using Bi-2223 HTS tapes. The coil system consists of double pancake magnet and a persistent current switch and jointed them with solder. Persistent current mode operation of the system was measured experimentally by the decay behavior of the current. We found that resistive component of the system including flux flow resistance lead the exponentially field decay with time

### 1. 서 론

초전도체로 구성된 마그네트나 에너지 저장장치 등은 일반적으로 일정 전원 공급 이후에 외부 전원장치에 의한 에너지 공급이 없는 영구 전류 모드로 운전된다. 이러한 영구 전류 스위치는 초전도 시스템에 안정적인 전원 공급이 가능하게 해 양·질의 자장을 얻을 수 있게 하며, 전류 도입선을 제거할 수 있게 되어 상온단으로 부터의 불필요한 열침입을 막고 상온단과 극저온부의 연결부에서 발생하는 발열을 없애서 냉매의 소비를 줄일 수 있는 등 경제적으로 운전 비용을 절감할 수 있는 장점을 가지고 있다. 고온 초전도체로 제작된 영구전류 스위치 시스템은 n-value가 작은 고온 초전도체가 저온 초전도체에 비해서 flux-flow 저항이 크다는 단점을 지니지만 고온 초전도체는 저온도체에 비해 높은 임계 자장을 가지므로 고자장의 시스템에 적용될 수 있는 여지를 가지고 있다. 영구 전류 모드로 동작되는 초전도 전력 시스템을 제작하기 위해서는 초전도 선재간의 접합이 필수적으로 요구된다. 일반적으로 세라믹 계열의 고온 초전도체는 금속 계열의 좋은 기계적인 특성을 가지는 저온초전도체에 비해서 접합 방법이 어렵다. 또한 고온 초전도체

특유의 높은 비열로 인해 스위칭 시에 많은 열량을 투입해야 하는 등 고온 초전도체로 제작된 영구전류 시스템은 저온초전도 시스템에 비해 다소 어려움이 있으며, 다른 기술이 요구되므로 현재 접합 기술을 중심으로 활발한 연구가 진행중에 있다. 본 논문에서는 고온초전도체를 이용한 영구전류 스위치 시스템을 제작하여 그 특성을 평가하였다.[1]

### 2. 본 론

#### 2.1 고온 초전도체로 제작된 마그네트와 영구전류 스위치.

고온 초전도체로 제작된 영구전류 시스템을 제작하기 위해서 Bi-2223 고온 초전도 테이프를 이용하여 마그네트와 영구전류 스위치를 설계하여 제작하였다. 마그네트는 더블 팬케이크 형태이며, 제작에 사용된 초전도 테이프는 모두 14 m로 상하 각각 25회씩 G10 보빈에 권선 하였고 층간 절연을 두께 25  $\mu\text{m}$ 의 Kapton 필름을 사용하였다. 권선에 의한 기계적 특성이 감소되는 것을 막기 위해 직경이 75 mm인 보빈을 사용하였다. 마그네트는 1 [A] 당 약 10 [gauss]의 중심 자장이 발생하도록 설계되었으며 마그네트의 중심부에 홀 소자를 설치하여 자장 특성을 평가한 결과 기대했던 자석 상수에 부합하는 결과를 얻을 수 있었으며 그림 1에 마그네트의 전압 전류 특성 곡선과 함께 도시하였다. 제작된 마그네트의 n값은 0.1~1  $\mu\text{V}/\text{cm}$  전계 범위에서 11.7이었다. LCR 미터로 측정된 마그네트의 인덕턴스 역시 약 0.4 mH로 설계 단계에서 예측한 바와 잘 부합하였다. 영구전류스위치의 제작에는 모두 1.5 [m]의 고온 초전도 테이프가 사용되었으며, 스위칭 기능을 위한 영구전류스위치의 켄치를 위해 Lakeshore사의 Ni-Cr 히터가 함께 권선 되었다. 켄치 온도를 모니터링하기 위한 열전대가 부착되었고 마그네트와

Table 1. Specification of the magnet/PCS

HTS magnet		
내경	(mm)	75
외경	(mm)	90.8
높이	(mm)	8.8
권선수	(turns)	54
인덕턴스	(mH)	0.32
권선길이	(m)	14
영구전류스위치(PCS)		
내경	(mm)	75
외경	(mm)	77.4
Heater wire		
		Ni-Cr

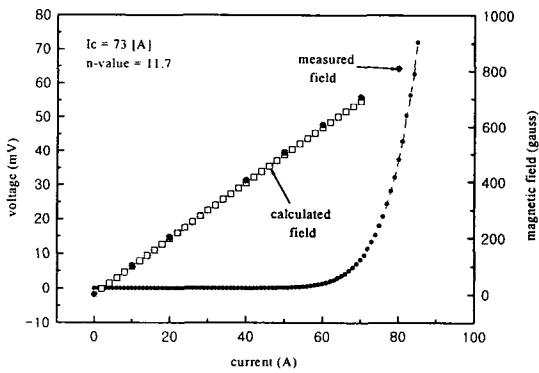


Fig. 1. The V-I characteristics of the HTS magnet and comparison between calculated and measured magnetic field density at the center of the coil

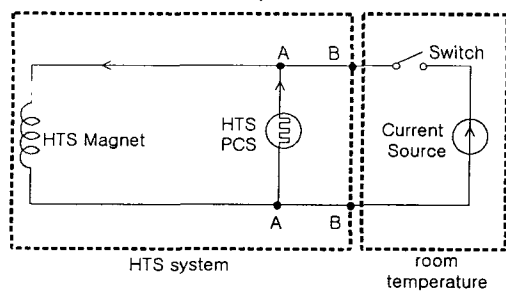


Fig. 2. A schematic of the persistent current switch system

영구전류스위치는 PbSn 솔더를 이용하여 접합하였다. 제작에 사용된 고온 초전도 테이프와 마그네트 및 영구전류스위치의 사양을 표 1에 나타내었다.

그림 2에서는 제작된 영구전류스위치 시스템의 구성도 개략적으로 도시하였다. 이미 널리 알려진 바와 같이 영구전류스위치는 마그네트에 전원을 여자할 때 초기에 영구 전류 스위치는 저항이 있는 상전도 상태로 존재하여 마그네트 쪽으로 전원을 전달하고 영구전류 모드로 전환할 때 초전도 상태로 돌아와 지속적으로 마그네트에 전원을 공급할 수 있는 스위칭 기능을 가져야 한다.

## 2.2 영구전류 동작 실험

그림 2에서 도시한 바와 같은 영구전류스위치의 운전 동작 특성을 위한 장치가 액체 질소가 담겨진 저온조에 설치되었다. 영구전류 모드의 운전을 위한 실험 순서는 다음과 같다.

- ① 영구전류스위치에 감겨진 히터에 전원을 공급하여 상전도 상태로 만든다.(heater on≡PCS off)
- ② 마그네트에 전류를 여자시킨다.(ramping up)
- ③ 여자 전류가 목적치에 도달하면 일정 시간에 PCS의 전원을 제거하여 PCS를 초전도 상태로 만든다.(heater off≡PCS on)
- ④ 마그네트의 전류를 소거시킨다. (ramping down)

그림 3에서는 완성된 영구 전류 스위치 시스템의 운전 형태를 위의 순서에 따라 실험한 순서도를 도시하였다. 그림 3에서와 같이 초기에 히터에 전원을 투입하여 영구전류 스위치를 완전히 상전도화 시키고 마그네트로의 전원 투입 60초 후에 히터의 전원을 제거하여 영구전류 스위치를 동작 시켰다. 그림 3에 보이는 바와 같이 히터가 동작되는 동안 히터가 동작되는 동안에 마그네트의 자장에 변화가 없는 것으로 영구전류 스위치가 완전히 켜져 있어 공급되는 전원이 마그네트 쪽으로 전달되고 있음을 알 수 있다. 그리고 마그네트에 전원이 차단된 후 마그네트와 영구전류스위치간에 전류의 흐름을 홀소자를 이용하여 측정하였으며 그림 3에 감쇠 되는 전류를 자장의 형태로 측정하여 도시하였다.

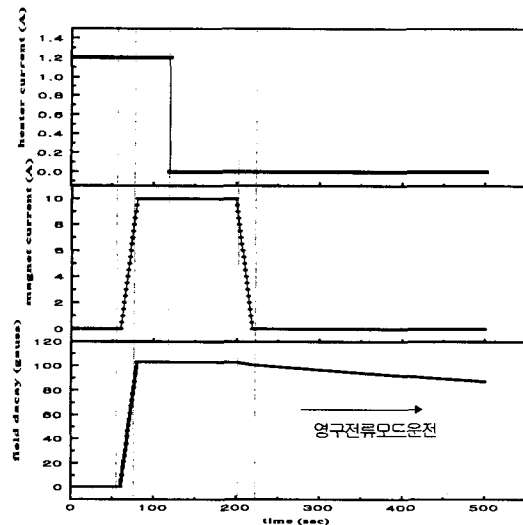


Fig. 3. A schematic sequence for persistent current mode operation

## 3. 결과 및 고찰

본 논문에서는 몇 가지 전류 크기의 전원을 공급하면서 영구전류 특성을 살펴보았다. 측정의

순서는 그림 3에 나타난 내용과 동일하며, 실험 결과 마그네트에 인가하는 전원의 램핑 속도는 결과에 영향을 거의 미치지 않는 것으로 나타났고, 따라서 2.5(A), 5(A), 10(A), 20(A)의 전류를 초당 0.5(A)의 속도로 증가 및 감소시키면서 영구전류에 의해서 발생하는 자장을 측정하여 이를 그림 4에 도시하였다. 그림에서 보이는 바와 같이 다소 높은 저항 성분으로 인하여 영구전류용 페루프 시스템은 전류가 점차 감소하게 되며 외부 전원 제거 후 12000초 이후에 측정된 자장으로 볼 때 잔류 전류는 2(A) 이하인 것으로 측정되었다. 전원 제거 후 영구전류 시스템에 흐르는 전류는 시정수  $\tau = L/R$ 까지 지수함수적으로 감쇄하게 되고, 그림 4에서 처럼 인가 전류 값이 큰 경우 초기 전류 감쇄가 빠르게 일어나는 특징을 보이고 있지만, 전류가 작아 질수록 다소 선형적인 전류 감쇄 특성을 보이고 있다.[2]

초전도 영구전류스위치 시스템에서 전류 여자 후 전류 감쇄는 다음과 같은 식에 의해서 표현된다.

$$I = I(t_0) \times \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \quad (1)$$

따라서 그림 4, 5에서 측정된 전류 감쇄 곡선을 이용하면 이때의 시정수를 통해 영구전류시스템의 저항성분을 구할 수 있다. 여자 전류가 2.5, 5, 10, 20(A)일 때 시정수는 각각 2353, 2316, 2204, 2067(sec)이며, 시정수  $\tau$ 는  $L/R$ 의 관계를 갖고 있으므로 여기서 시정수법에 의해서 여자 전류에 대한 저항 성분을 구해보면 각각  $1.3598e-7$ ,  $1.3812e-7$ ,  $1.4518e-7$ ,  $1.5476e-7$  ( $\Omega$ )로 나타났다.

여기서 구해진 저항성분에는 초전도 마그네트와 영구전류 스위치의 접합을 통한 접합 저항

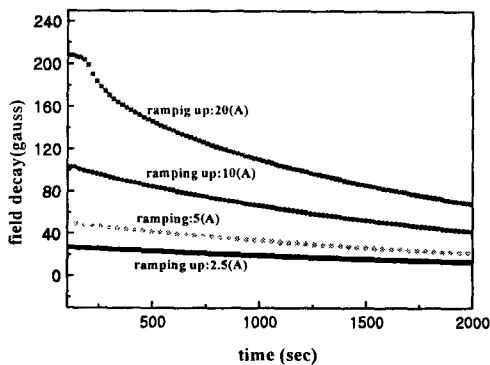


Fig. 4. Field decay after ramping down for each current.

성분과 flux flow 저항성분이 공존하는 것으로 사료되며, 초기에 빠른 감쇄를 보이는 것은 여자 전류가 커질수록 고온 초전도체 특유의 낮

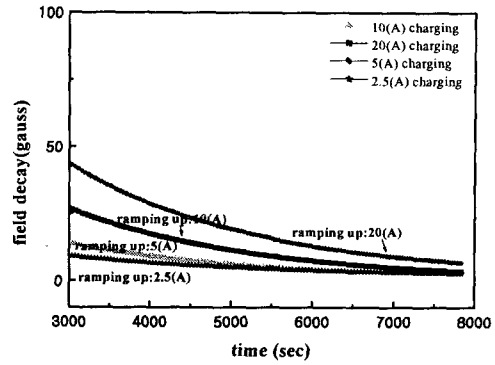


Fig. 5. The persistent current mode operation

은  $n$ 값으로 인한 flux flow 저항성분에 기인한 것으로 보고되고 있다.[2] 이러한 저항 성분으로 인해 12000(sec) 이후에 전류는 거의 소멸되는 것으로 측정되었다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 초전도체를 이용한 코일과 영구전류스위치 페루프 시스템을 이용하여 영구전류스위치 시스템의 특성 평가를 하였다. 마그네트용 코일과 영구전류 스위치는 솔더에 의해서 접합 되었으며 접합에 의한 접합 저항 성분과 통전되고 있는 전류에 의한 flux flow 저항성분으로 인해 여자된 전류는 12000초 이후에 2(A) 이하 수준으로 감쇄되는 특성을 보였다. 추후로 저항 성분을 최대한 제거시키는 연구를 통해 초전도 접합을 통한 접합저항의 최소화와 flux flow 저항이 없는 영역에서의 코일 시스템의 운전에 관한 연구로 개선된 영구전류 모드를 구현해야 할 것이다.

#### 감사의 글

본 연구는 에너지 관리공단 R&D 본부의 에너지 기술 학술진흥사업으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

#### [참 고 문 헌]

- [1] M.J. Leupold, "Superconducting joint bet. multifilamentary wires", Cryogenics, 16, pp215-216, 1976
- [2] K. Fukushima, "Development of Bi2212/Ag closed circuit for 1 GHz-NMR Spectrometer", Proc. MT-15, Beijing, , pp 812-815, 1997,