

BSCCO-2223 선재를 이용한 Prototype 영구전류스위치 시스템의 제작

강 형구, 김 정호*, 이 응로, 안 민철, 김 호민, 윤 용수**, 오 상수***, 주 진호*, 고 태국
연세대학교 전기전자공학과, 성균관대학교 금속재료공학부*, 안산공과대학 전기과**, 한국전기연구원***

Fabrication of Prototype Persistent Current Switch System Using by BSCCO-2223 Tape

Hyoungku Kang, Jung Ho Kim*, Eung Ro Lee, Min Cheol Ahn, Ho Min Kim,
Yong Soo Yoon**, Sang-Soo Oh**, Jin Ho Joo*, Tae Kuk Ko
Dept. of Electrical and Electronic Eng. Yonsei Univ., School of Metallurgical and Materials Eng.,
SungKyunKwan Univ., Dept. of Electrical Eng., Ansan College of Technology**, KERI***

maglev@yonsei.ac.kr

Abstract - The persistent current mode operation of HTS coils is one of the key technologies required for very high-field MRI magnets composed of LTS and HTS coils. But to date, the fabrication of persistent current mode system using HTS is not investigated well. In this paper, we fabricated the magnet and PCS using by BSCCO-2223 tape and jointed them with solder. The current decay behavior of the circuit was measured in liquid nitrogen by monitoring the magnetic field in the centre of magnet with a Hall sensor. To enhance the characteristic of persistent current mode system, superconducting joint method should be investigated.

1. 서 론

MRI, SMES, MAGLEV 등과 같은 초전도 마그네트 시스템들은 일반적으로 영구전류 모드에서 운전이 되기 때문에 외부 전원은 초전도 마그네트에 아무런 에너지도 공급하지 않으며 전류 손실을 보충할 경우에만 쓰인다. 영구전류 모드에서는 시간에 따르는 전류의 균일성 및 안정성이 매우 뛰어나 최고 양질의 DC전원을 사용하는 효과를 나타낸다. 특히 전류 감쇄율이 10^{-8} A/h 이하의 상태에서 장시간동안 운전되는 NMR Spectrometer의 경우 반드시 영구전류 모드에서 동작이 되어야 한다. 또한 마찬가지로 영구전류 모드를 이루면 Cryostat로부터 외부 전류 도입선의 차단, 제거가 가능해지므로 상온-극저온 접합부에서 발생하는 열 손실을 없앨 수가 있다. 이에 따라 운전비를 절감하는 등의 여러 가지의 투자비용을 감소시킬 수가 있다. 이러한 초전도

자석 시스템에서는 영구전류 스위치(Persistent Current Switch, PCS)가 필수적인 요소가 된다. 저온 초전도선재를 이용한 PCS 시스템의 경우에는 이미 상용화가 이루어질 정도로 개발이 되어졌지만, 고온 초전도선재의 경우에는 높은 비열에 의한 켄치의 어려움과 더불어 PCS와 초전도 마그네트 간 접합의 어려움 등 여러 가지 이유 때문에 아직까지 많은 연구가 이루어져있지 않은 실정이다. 본 연구에서는 BSCCO-2223 초전도선재를 이용한 prototype 영구전류스위치 시스템을 제작하고 그 특성을 살펴보았다.

2. 본 론

2.1 마그네트와 영구전류스위치

PCS 시스템을 제작하기 위해서 BSCCO-2223 초전도선재로 제작된, 초전도 마그네트와 PCS가 사용되었다. 사용된 초전도선재의 특성과 마그네트의 사양을 다음의 표 1에 나타내었다. 초전도 마그네트에 흐르는 전류의 크기에 따른 유도 자기장의 세기를 측정하여 다음의 그림 1에 나타내었다.

Table 1. Characteristic of Superconducting Tape and Superconducting Magnet

| 초전도 선재 | | | | | | |
|---------------|----------|---------|------------|--------|----------|----------------|
| Ic | matrix | n value | 두께 | 너비 | filament | S/C Fraction |
| 9A | Silver | 18 | 0.25 mm | 4.4 mm | 37 | 34 % |
| 마그네트(더블 팬케이크) | | | | | | |
| 내경 | 외경 | 높이 | Inductance | turn 수 | 길이 | 절연 |
| 75 mm | 115.6 mm | 7.6 mm | 2.5 mH | 146 | 43.4 m | Kapton (25 μm) |

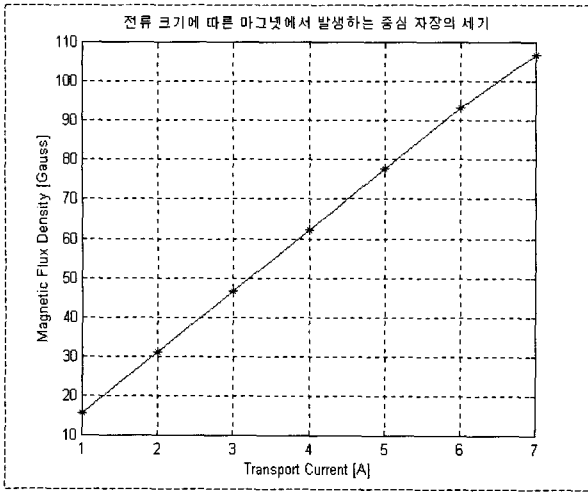


Fig. 1. The magnetic field in the centre of magnet with various current

자기장의 세기는 마그넷의 중심에서 측정된 값이며 이 자기장의 세기를 통해서 PCS 시스템에 흐르는 전류의 세기를 간접적으로 측정할 수 있다. 또한 PCS의 길이는 3.2 m이며, 전류 인가 시에 발생할 수 있는 자계에 의한 교란을 최소화하고, PCS를 퀘치시켰다가 초전도 상태로 회복하여 영구전류 모드를 이룰 때 전류가 초전도 마그넷에서 PCS 쪽으로 최대한 빠른 시간에 bypass되게 하기 위해서 무유도성으로 권선하였다.

2.2 PCS 시스템의 구성

PCS 시스템의 구성은 초전도 마그넷과 PCS, 그리고 MPS(Magnet Power Supply)가 서로 병렬로 연결되어있는 구조로 되어 있으며, 다음의 그림 2에 나타내었다. 아래의 그림 3은 초전도 마그넷과 PCS를, solder를 이용하여 접합하여 제작한 prototype의 PCS 시스템의 모습이다.

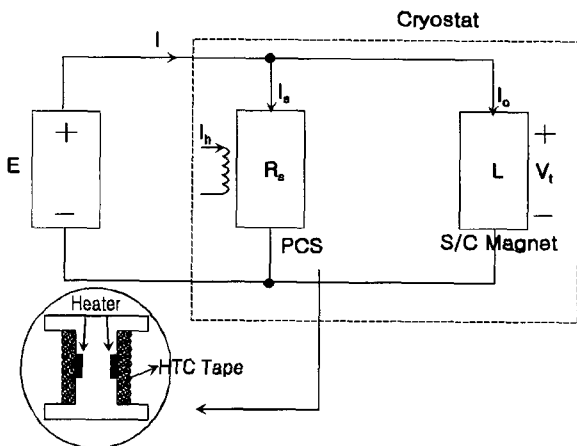


Fig. 2. Circuit diagram of the Persistent Current Switch System

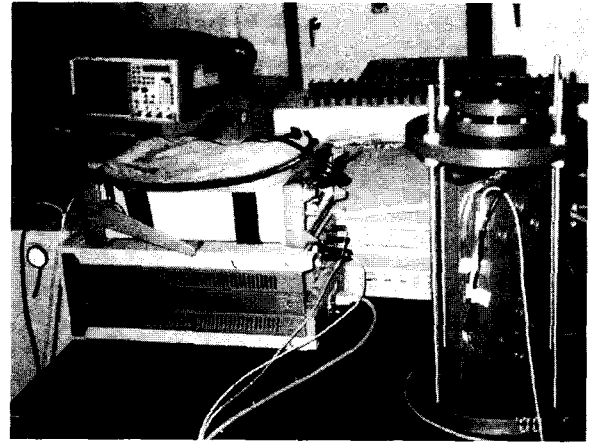


Fig. 3. Persistent Current Switch System

PCS와 초전도 마그넷의 보빈은 각각 MC 나일론과 베이클라이트를 사용하였으며, 전류에 의한 자계 교란을 최소화하기 위해서 시스템 연결부는 비자성체인 황동으로 제작하였다. 본 실험에서 초전도 마그넷과 PCS의 접합길이는 2 cm로 하였으며, 접합부 한군데에서의 접합저항은 약 $1.8 \times 10^{-8} \Omega$ 이었고 n value의 값은 크게 감소하지 않은 17 정도였다. 고온 초전도선재는 저온 초전도선재에 비해서 비열 값이 수백 배 이상 크므로 열적으로 상당히 안정한 특성을 가진다. 따라서 액체질소 온도 하에서 고온 초전도선재를 퀘치시켜주기 위해서는 상당히 큰 열량이 필요하며 단열 과정이 매우 중요하게 된다.

본 연구에서, PCS의 길이는 3.2 m이며 이를 완전 퀘치시켜주기 위해서 히터에는 약 77 W의 전력을 공급해 주었다.

2.3 실험 순서와 방법

다음의 그림 4와 같은 순서에 따라서 영구전류 모드 실험을 하였다. 본 실험은 77 K 액체질소 온도 하에서 이루어졌으며 전류 감쇄율은 초전도 마그넷의 중심에 위치한 홀센서(HG06169)를 이용하여 측정하였다.

PCS 시스템에서의 전류 감쇄율은 다음의 식 1과 같이 나타낼 수 있다.

$$I = I_{(t=0)} \times \exp(-t/\tau) \quad (1)$$

영구전류 모드를 이루기 위해서는 초전도 마그넷용 전원 전류를 선형적으로 증감시켜야 한다. 히터전류에 의한 발열이 없도록 히터를 꺼주면 PCS는 초전도 상태가 된다. 이 때에는 전원 전류를 서서히 감소시켜도 양단의 마그넷 전압은 '0'이므로 마그넷 단의 전류 변화는 없게 되고, 선형 감소되는 만큼의 전원 전류값은 무저항, 무유도성의 PCS 쪽으로 흐르게 된다. 즉, 전원 전류가 PCS 측으로 전이되는 것이다.

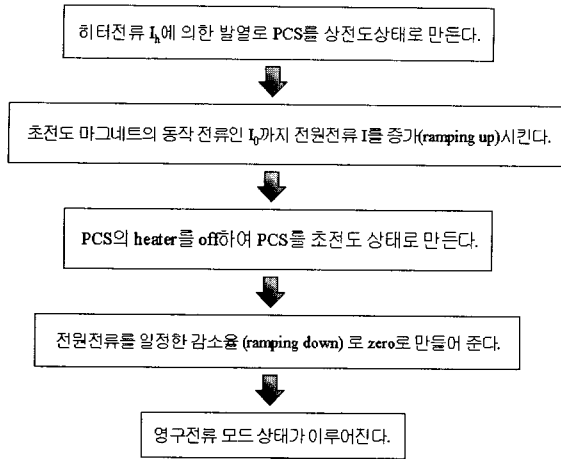


Fig. 4. Operation sequence of Persistent Current Switch System

만일 짧은 시간에 전원 전류의 값을 감소시켜 버린다면 전원 전류가 PCS 쪽으로 전이되지 못하여 영구전류 모드가 성립되지 못할 것이다.

2.4 실험결과 및 토론

그림 4와 같은 순서에 따라 영구전류 모드 실험을 하였다. PCS의 켄치는 스위치 양단에서 발생하는 유기 전압값과 열전대(Thermo-couple)를 이용하여 PCS 내부에서의 온도를 측정 한 값으로 확인하였다.

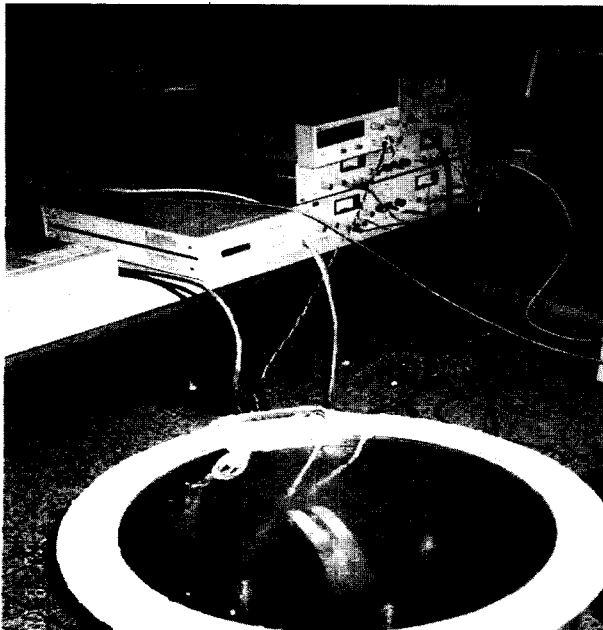


Fig. 5. Experiment of Persistent Current Switch Mode

위의 그림 5에 영구전류 모드 실험의 전경을 나타내었다. 그림 6에는 같은 조건의 길이 70 cm BSCCO-2223 선재에 48 W의 전력을 가해 주어 액체질소 온도 하에서 켄치시켜 주었을 때 나

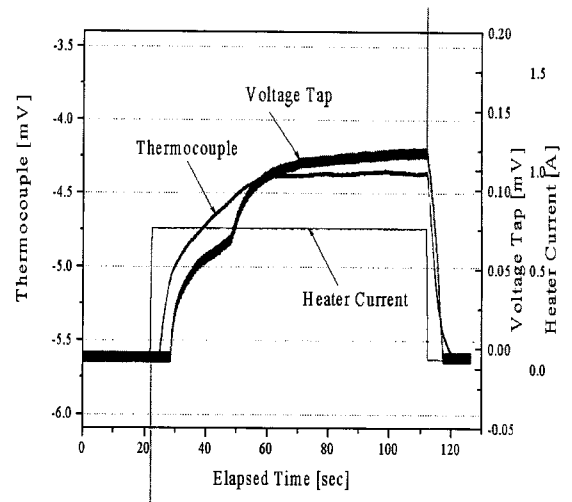


Fig. 6. Quench characteristic of BSCCO-2223 Tape

타나는 선재 양단의 전압과 선재 내부의 온도 변화를 나타내었다. 이 실험 결과를 살펴보면, BSCCO-2223 선재의 온도가 77 K에서 120 K까지 상승하는데 약 40 여 초가 소요되었으며 초전도성을 다시 회복하는데는 10 여 초가 소요되는 것을 알 수 있었다. 전압 역시 켄치를 1 $\mu\text{V}/\text{cm}$ 로 정의한다면, 켄치되는데 대략 30 여 초가 소요되는 것을 알 수 있다. 이와 같이 켄치되고 다시 회복되는 응답속도가 느린 것은 BSCCO-2223의 비열이 상당히 크기 때문인 것으로 사료된다.

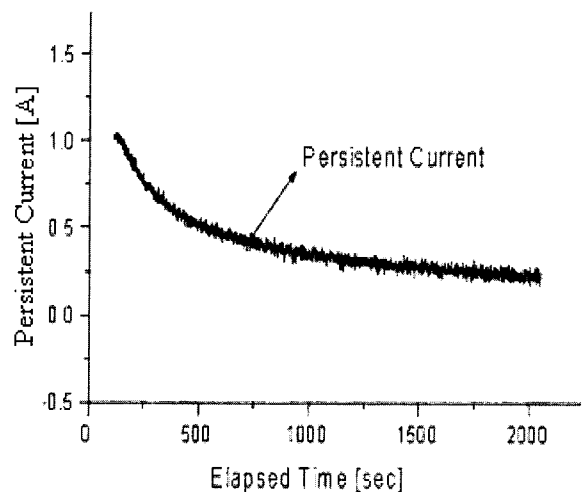


Fig. 7. Decay of current in the closed loop

실제, 이론상으로 단위 체적의 BSCCO-2223 선재를 켄치시켜 주기 위해서는 대략 494,190 $[\text{J}/\text{m}^3]$ 정도의 열량이 필요하다. 다음

의 그림 7은 초전도 마그네트를 1 A로 충전시킨 후에 영구전류 모드 상태를 이룬 후의 전류 감쇄를 측정하여 나타낸 그림이다. 이 실험의 결과에서 볼 수 있듯이 저온 초전도선재를 초전도 접합하여 제작한 시스템에서의 영구전류 모드에 비해서 고온 초전도선재를 이용하여 저항 접합시킨 시스템에서의 전류 유지 능력이 매우 저하되는 것을 알 수 있다. 이는 solder로 인하여 발생한 저항값이 초전도접합에 의한 접합 저항값보다 훨씬 크기 때문이다.

3. 결 론

본 연구에서는 solder를 이용하여 prototype PCS 시스템을 제작하였다. solder에 의한 접합 저항의 값은 $10^{-6} \sim 10^{-8} \Omega$ 정도로 초전도 접합 시 발생하는 접합 저항인 $10^{-12} \Omega$ 정도에 비해 상당히 크므로 전류 감쇄율 역시 크게 된다. 그림 7의 실험 결과를 보면, 초기 충전전류 1 A가 영구전류 모드를 이룬 후에, 페루프 시스템에서 2,000 초 후에는 약 0.3 A로 줄어드는 것을 볼 수 있다. 이와 같은 비효율적인 전류 감쇄율 특성을 개선하기 위해서는 고온 초전도선재의 초전도 접합에 관한 연구가 이루어져야 할 것이다.

(참 고 문 헌)

[1] Tsukasa Kiyoshi, Kiyoshi Inoue, M Kosuge, Hitoshi Wada and Hiroshi Ma "Current Decay Evaluation of Closed HTS Circuits", IEEE trans. on App Superconductivity, Vol. 7, 877-880, No. 2 1997

[2] Drew W. Hazelton, Michael T. Gardner, [1] John M. Weloth and Joseph A. Rice, "HTS Insert Coils for Ultra High Field NMR Spectroscopy", IEEE trans. on Applied Superconductivity, Vol. 7, 885-888, No 2, June 1997

[3] Z. Han, P. Vase, Y. Q. Shen, an Freltoft, "Superconducting Bi2Sr2Ca2C Closed-loop Coils Carrying Persistent Cu at Temperature above 77 K", IEEE tran Applied Superconductivity, Vol. 7, No. 2 1997

[4] T. Hase, K. Shibusani, S. Hayash Shimada, R. Ogawa, Y. Kawate, T. Ki and K. Inoue "Operation of superconduc jointed Bi-2212 solenoidal coil in pers current mode", Cryogenics, Vol. 37, p201.

[5] W. D. Markiewicz, I. R. Dixon, Y. M. Eyssa, H. J. Schneider-Muntau, "Technolo 1GHz NMR superconducting magnets", Ph B, Vol. 216, p200, 1994

[6] Keiji Fukushima, Michiya Okada, Junichi Sato, Tsukasa Kiyoshi, Hiroaki Kumakura, Kazumasa Togano, and Hitoshi Wada, "Persistent Mode Operation of Bi2Sr2CaCu2Ox/Ag Stacked Double Pancake Coils with Superconducting Joints, Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 36, 1433-1435, 1997

[7] J. E. Tkaczyk, R. H. Arendt, Bednarczyk, M. F. Garbaskas, B. A. Jon J. Kilmer, K. W. Lay, "Superconducting Formed Between Powder-In-Tu Bi2Sr2Ca2Cu3Oz/Ag Tapes", IEEE trans Applied Superconductivity, Vol. 3, 946-94 1, June 1991