

자장감쇄법을 이용한 Bi-2223/Ag 선재의 접합저항 측정 평가

김정호, 김규태, 주진호, 최세웅*, 나완수*, 하홍수**, 오상수**
성균관대학교 금속재료공학부, 전기전자컴퓨터공학부*,
한국전기연구원 초전도 응용연구그룹**

Measurement of joint resistance of Bi-2223/Ag tapes using field decay technique

Jung Ho Kim, Kyu Tae Kim, Jinho Joo, Seyong Choi*, Wansoo Nah*,
Hong-Soo Ha**, Sang-Soo Oh**

School of Metallurgical and Materials Engineering,
School of Electrical and Computer Engineering*, SungKyunKwan University
Applied Superconductivity Lab**, Korea Electrotechnology Research Institute

dune7414@mail.skku.ac.kr, jinho@skku.ac.kr

Abstract - Considering the application of high temperature superconductor to MRI, the loss at conductor joint would be very important. Therefore, we have carried out a measurement of joint resistance of Bi-2223/Ag tapes at 77 K. A pancake coil was wound by Bi-2223/Ag tape. Both ends the tape were overlapped and soldered to each other. The DC current is induced in the pancake coil by energizing the excitation coil wound by copper wire closely located to the pancake coil. The decay behaviour of the current in coils was clearly separated in two regimes, and initial fast decay of the order of minutes followed by a slow logarithmic-like decay. From this data, the resistance of the joint was evaluated as $2.74 \text{ m}\Omega$

1. 서 론

영구전류형태로 운행되는 초전도 마그네트 시스템 제작시 초전도 접합은 중요한 핵심기술이며 접합부에 대한 성능평가는 반드시 이루어져야 한다. 특히, 초전도 선재간의 접합은 마그네트 설계를 만족시킬 수 있는 전기적, 기계적, 열적 요구조건에 만족해야하는데, 만약 마그네트 시스템의 운전전류에서 접합저항으로 인하여 줄열이 발생된다면 마그네트의 안정도를 떨어뜨리게 된다. 이와 같이 접합부의 전기적 성능평가는 전체 마그네트 시스템의 안전성을 평가하는데 중요한 요소가 되므로 정밀한 측정방법이 요구되고 있다.

영구전류모드형태로 운행되는 MRI나 NMR 시스템에서 마그네트는 높은 자기균일도와 0.1 ppm/hr 이하의 자계안정성을 갖어야 하며, 이런 특성을 얻기 위해서는 몇 개의 마그네트를 서로 조합해야만 가능하다. 따라서, 많은 부위에서 선

재간의 접합이 필요하며 접합부의 최소 저항은 $10^{-12} \Omega$ 이하로 요구된다. 현재까지 알려진 측정방법으로 비교적 높은 저항측정에 사용되는 4 단자법으로는 낮은 저항값 측정이 불가능하기 때문에 정확한 접합부의 저항을 측정하기 위해서는 자장감쇄법(field decay technique)을 이용해야 한다.

본 연구에서는 자장감쇄법을 이용하여 초전도 페루프 코일에 유기되는 자장을 측정하여 접합저항을 계산하였으며, 또한 전류 여자시간에 따른 접합저항의 차이에 대해서도 연구하였다.

2. 본 론

2.1.1 초전도 페루프 코일의 제작

접합저항을 측정하기 위한 초전도 페루프 코일은 총 길이 약 1.8~2 m인 Ag 합금선재를 사용하여 G-10 보빈(외경:45 mm)에 더블팬케이크 형태로 감아 제작하였다. 코일의 형상은 각 층에 5 턴씩 감았으며 여유 길이는 각각 15 cm를 남겨 접합하는데 사용하였다. 또한, 선재간의 절연은 25 μm 두께의 캡톤필름으로 절연하였으며 접합부 길이는 5 cm로 하였다. 제작된 초전도 페루프 코일은 유도전류 값을 예측하기 위해 전류를 인가한 후 자장값을 측정하였다. 마그네트 중심부에서 2.6 gauss/A를 발생시키는 것을 확인하였다.

2.1.2 여자코일의 제작

초전도 페루프 코일에 전류를 여자시키기 위해 외부마그네트를 제작하였다. 여자코일은 직경 0.6 mm의 에나멜선을 사용하여 총 300 턴을 감아 사용하였다. 각 코일의 인덕턴스(L)와 코일의 상호 인덕턴스(M)는 유한요소법(FEM)을 이용하여 계산하였으며, 이 값은 실제 L.C.R. 미터의 측정치와 거의 유사함을 확인하였다. 표 1은 초전도 페루프 코일과 여자코일의 제원을 요약하였다.

2.1.3 접합저항 측정방법 및 계산

접합저항 측정방법은 자장감쇄법(field decay technique)을 이용하여 측정하였다. 이 측정법은 외부자장을 초전도 페루프에 일정시간 인가한 후 외부자장을 제거하면 초전도 페루프 코일에 유도전류가 발생한다. 이 유도전류에 의해 발생하는 자장값을 홀센서로 측정하는 방법이다. 그림 1은 초전도 페루프 코일과 여자코일의 형상 그리고 측정회로도를 나타내었다.

초전도 페루프에 유기된 값들은 전기회로에서 전기가 선형적으로 감쇄될 때 시간에 따른 전류 변화의 형태로 식 (1)로 표현할 수 있다 [1].

$$I(t) = I(t_0) \left[1 - \frac{R}{L} t \right] \quad (1)$$

여기서 $I(t_0)$ 는 초기전류이며 R 은 접합저항과 flux-flow 저항을 포함하는 값이다. L 은 초전도 페루프의 코일의 인덕턴스이다. 접합저항 계산 시 R 은 접합저항과 flux-flow 저항을 포함하기 때문에 초기 급격히 감소하는 부분을 제거한 후 선형적으로 감소하는 부분만으로만 계산하여야 한다. 따라서, 식 (2)을 이용하여 접합저항을 계산하는데 사용하였다.

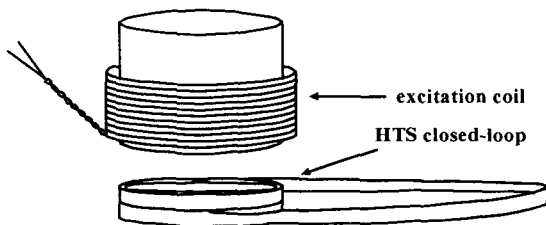
$$R_{joint} = \frac{\Delta I}{I(t_0)} \frac{L}{\Delta t} \quad (2)$$

2.2 결과 및 고찰

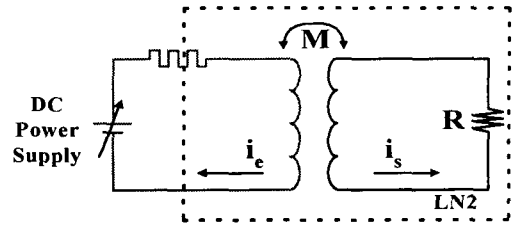
그림 2는 여자코일 자체의 잔류자장특성을 평가한 그림이다. 그림에서 보듯이와 같이 여자코일에 전류를 0.5 A/sec로 5 A의 목적전류까지 인가한 후 일정시간 유지, 다시 같은 비율로 감소시킨 후 자장값을 측정하였다. 그 결과 여자코일의 전류값이 0 이 되는 순간 측정된 자장값은 0 이 되는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 제작된 여자코일의 잔류자장은 0 임을 알 수 있다.

Table 1. The main parameters of coils

	HTS closed-loop	Excitation coil
Total turns	10	300
Inductance	7.4 μH	5.6 mH
Mutual inductance	0.92 mH	



(a)



(b)

Fig. 1. (a) Structure of HTS coil and excitation coil and (b) experimental circuit

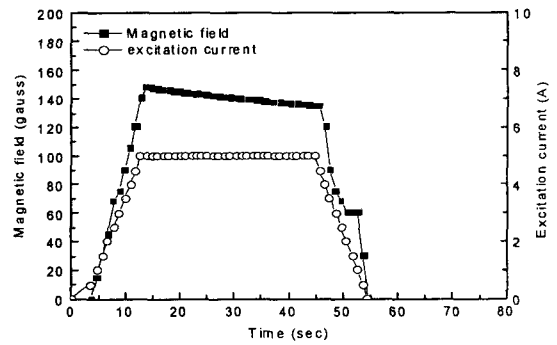


Fig. 2. The residual field characteristic of the excitation coils after ramping down

그림 3은 실험장치로부터 측정된 초전도 페루프 코일에 유도된 자장값을 나타낸 그림이다. 측정된 데이터를 보면 앞에서 언급했듯이 여자코일의 전류가 0 이 되면 여자코일 자체의 잔류자장이 없음에도, 초전도 페루프 코일의 중심부에서는 20~40 gauss 자장이 나타나는 것을 알 수 있었다. 이는 여자코일에 의해 초전도 페루프 코일에 전류가 유도되었음을 알 수 있다.

그림 4는 시간에 따른 유도 자장값을 나타내었다. 그림에서 보면 초기 120 초 동안에는 자장값이 급격히 감소함을 알 수 있었으며, 이후

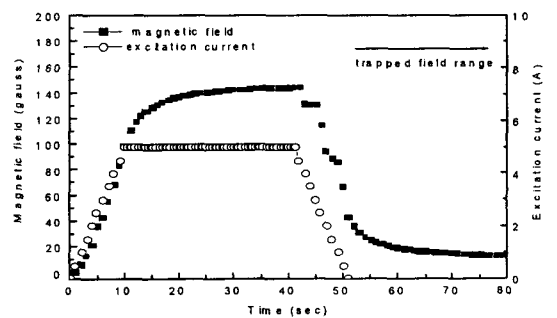


Fig. 3. The time variation of a magnetic field

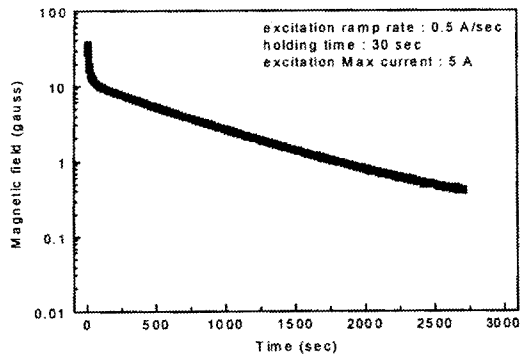


Fig. 4. Experimental results of magnetic field decay behavior of the closed loop

자장값의 변화는 선형적으로 변화하는 것을 관찰할 수 있었다. 초기에 빠른 자장값의 변화는 페루프 마그네트의 flux-flow 저항 요소가 컸으리라 사료되며 따라서 페루프 초기의 저항은 접합저항과 flux-flow 저항에 의해 비선형적으로 급격히 변화한다는 것을 알 수 있었다 [2]. 따라서 접합저항의 계산은 초기 비선형적으로 변화하는 120 초 동안의 구간을 제외한 후 식 (2)로부터 계산하였다. 접합저항을 계산한 결과, 저항은 $2.74 \text{ m}\Omega$ 이었으며 이 결과는 감쇄시정수 ($\tau=L/R$)로 계산한 예측치 $11.7 \text{ m}\Omega$ 보다 더 작은 값을 보이고 있다. 이는 flux-flow 저항요소가 고려되지 않아 더 낮은 값을 보이는 것으로 사료된다.

그림 5는 유도코일 여자전류의 ramping up, down 특성에 따른 페루프의 유도자장곡선이다. 그림에서 보듯이 시간에 따라 유도자장 값의 선형기울기의 차이는 없으며 이로부터 계산된 저항값은 모두 $2.74 \text{ m}\Omega$ 이었다. 따라서, 접합저항 측정시 여자코일의 ramping up, down의 변수는 페루프의 저항값 측정 결과에는 큰 영향을 주지 못하며 초기 유도 자장값에만 영향을 주는 것으로 판단된다.

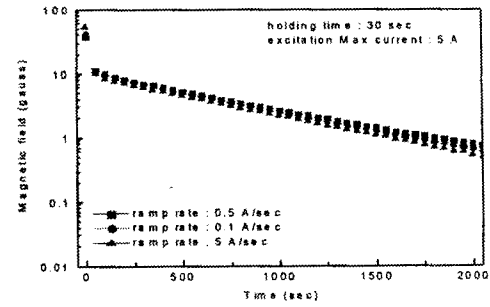


Fig. 5. The decay behaviour of magnetic fields in a closed-loop coil at different ramp rate

3. 결 론

접합저항을 측정하기 위해 페루프 초전도 코일을 제작하였다. 접합저항의 측정은 자장감쇄법을 이용하여 측정하였으며 계산 결과 페루프의 접합저항은 $2.74 \text{ m}\Omega$ 이었다. 이 결과는 감쇄시정수 ($\tau=L/R$)로 계산한 예측치 $11.7 \text{ m}\Omega$ 보다 더 작은 값을 보이며 이는 flux-flow 저항요소가 고려되지 않아 더 낮은 값을 보이는 것으로 사료된다. 또한, 접합저항 측정시 여자코일의 ramping up, down의 변수는 페루프의 저항값 측정에 큰 영향을 주지 못하며 초기 유도자장값에만 영향을 주는 것으로 판단된다.

감사의 글

본 과제는 에너지관리공단 R&D 본부의 에너지기술 학술진흥사업으로 수행되었음.

[참 고 문 헌]

- [1] M. J. Leupold, Y. Iwasa, "Superconducting joint between multifilamentary wires", *Cryogenics*, 16, 215-216, 1976
- [2] K. Tasaki, K. Yamamoto, K. Koyanagi, H. Onoda, Y. Yamada and O. Horigami, "Cryocooler-cooled Bi-2223 superconducting magnet carrying persistent current", *Proc. of MT-15, Beijing, China*, 812-815, 1998