

(Bi,Pb)₂Sr₂Ca₂Cu₃O_x 선재간의 접합저항 연구

김정호^{*}, 김규태^{**}, 주진호^{***}, 최세용^{*}, 나완수^{*}, 강형구^{**}, 고태국^{**}, 하홍수^{***}, 오상수^{***}
성균관대학교 금속재료공학부, ^{*}정보통신공학부,
^{**}연세대학교 전기전자공학과, ^{***}한국전기연구원 초전도응용연구그룹

A study of joint resistance between (Bi,Pb)₂Sr₂Ca₂Cu₃O_x tapes

Jung Ho Kim, Kyu tae Kim, Jinho Joo, Seyong Choi, Wansoo Nah,
Hyoungku Kang, Tae Kuk Ko, Hong-Soo Ha, Sang-Soo Oh
School of Metallurgical and Materials Eng., SungKyunKwan University,
^{*}School of Information and Computer Eng., SungKyunKwan University,
^{**}Department of Electrical and Electronic Eng., Yonsei University,
^{***}Applied Superconductivity Lab., Korea Electrotechnology Research Institute

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

Abstract - We joined 19-multifilamentary (Bi,Pb)₂Sr₂Ca₂Cu₃O_x superconducting tapes and fabricated double-pancake coils by using resistive- and superconducting-joint methods. The joint resistance of the coils were characterized by the field decay technique and standard four-probe method.

It was evaluated that joint resistance was $3.21 \times 10^{-11} \Omega$ in the superconducting-joint coil, which is approximately 4 orders of magnitude smaller than that in the resistive-joint coil ($107 \times 10^{-9} \Omega$). The low value of joint resistance obtained by superconducting-joint is expected to be suitable for the practical applications in the persistent current mode.

1. 서 론

일반적으로 1 GHz 이상의 고 자장용 NMR 마그네트에서는 Bi₂Sr₂Ca₁Cu₂O₈ 혹은 (Bi,Pb)₂Sr₂Ca₂Cu₃O_x 고온초전도선재가 내부코일로 많이 사용되고 있으며, 동작 시 영구전류모드로 운행이 된다 [1]. 이렇게 영구전류모드로 운행되는 초전도 마그네트 시스템의 제작 시 초전도 선재간의 접합은 중요한 핵심 기술이며 접합부의 성능평가는 시스템 설계 단계에서 선행되어야 한다. 만일 마그네트 시스템의 운행전류에 의해 접합부에서 국부적인 열 적, 기계적 손실이 발생된다면 전체 시스템의 안정도를 떨어뜨리게 된다. 그러므로 접합부의 성능평가는 전체 마그네트의 안전성을 평가하는데 중요한 요소 중의 하나이므로 반드시 평가되어야 한다.

영구전류모드로 운행되는 초전도 마그네트 시스템에서는 높은 자기균일도(10 ppm in 50 mm dsv)와 자계안정성(0.1 ppm/hr)을 요구한다. 또한 고균등 및 고자장을 필요로 하는 시스템의

특정상 수 개에서 수십 개의 마그네트가 조립되어야 하며 또한 스위치(persistent current switch; PCS)와 연결을 통해 영구전류모드로 운행하여야 한다. 이 같은 시스템 제작 시 단말부에서는 초전도 선재간 혹은 초전도-금속간의 접합이 필요하며 이때 영구전류모드 구현을 위해서 시스템의 전체 접합 저항은 최소 $10^{-10} \Omega$ 이하로 요구된다. 현재까지 알려진 측정기술로는 시료의 전압-전류 특성으로부터 저항을 측정하는 4 단자법이 있다. 이것은 일반적인 방법이지만, $10^{-10} \Omega$ 수준 이하의 접합 저항은 계측기의 노이즈나 측정 한계로 인해서 정확한 평가가 불가능하기 때문에 자장감쇠법(field decay technique)을 이용해야 한다.

본 논문에서는 (Bi,Pb)₂Sr₂Ca₂Cu₃O_x 선재로 더블 팬케이크 형태의 페루프 코일을 제작하여 접합저항 특성을 평가하였다. 접합부는 각각 상전도 접합방법과 초전도 접합방법을 이용하여 제작하였으며 접합방법에 따른 저항값을 비교하였다. 또한, 측정된 결과들은 4 단자법으로 측정된 결과와도 서로 비교하였다.

2. 본 론

2.1 실험방법

2.1.1 초전도 페루프 코일의 제작

접합저항을 평가하기 위한 초전도 페루프 코일은 1.5 m의 19심 선재를 사용하여 알루미늄 보빈에 더블 팬케이크 형태로 감아 제작하였다. 각 권선 간의 절연은 알루미늄 절연지를 사용하였으며 접합부 형상은 기도형태(praying hands-type)로 하였다. 접합부는 각각 상전도 접합방법과 초전도 접합방법을 이용하여 제작하였다 [2]. 제작된 페루프 코일의 자석상수와 인덕턴스는 2.5 gauss/A와 $3.0 \times 10^{-6} H$ 로 측정 및 계산되었다.

2.1.2 접합저항 측정법

초전도 페루프의 접합저항은 자장 감쇠법을 이용하여 측정하였다. 이 방법의 주요원리는 1차 코일에서의 자계로 인해 2차 회로 측에 유도된 전류의 감쇠를 측정하여 이로부터 접합저항을 계산하는 것이다. 초전도 페루프 코일에 발생된 유도 전류는 자계를 발생시키고, 이 값은 RL 회로로부터 식 (1)과 같이 표현할 수 있다. 여기서 $B(t_0)$ 은 초전도 페루프에 유도된 초기자장 값, R 은 접합저항과 인덕스 저항을 포함하는 폐회로 시스템의 저항이다. 또한 L 은 페루프의 인덕턴스이며 t 는 시간변수를 의미한다.

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

또한, Iwasa에 의해 보고된 바에 의하면 초전도 페루프에 유기된 자계는 전기회로에서 선형적으로 감쇄될 때 시간에 따른 자계 변화의 형태로 식 (2)로 표현할 수 있다 [3].

$$B(t) = B(t_0) \left[1 - \frac{R}{L}t\right] \quad (2)$$

2.2 결과 및 고찰

그림 1은 두 종류의 접합방법으로 제조되어진 페루프 코일의 유도전류 감쇠곡선이며, 유도 전류는 자계로 표현되었다. 접합부 길이는 접합방법에 관계없이 1 cm이다. 그림에서 보듯이 상전도 접합방법에 의해 제작된 페루프 코일(코일 1)에서는 유도자계가 120초 이 후에 완전히 소거되나 이와 대조적으로 초전도 접합방법에 의해 제작된 페루프 코일(코일 2)에서는 초기 100초까지 빠른 감쇠 현상을 보인 후, 500초까지는 서서히 감소하며 이 후 약 1 시간까지 감소 현상을 거의 관찰 할 수 없다.

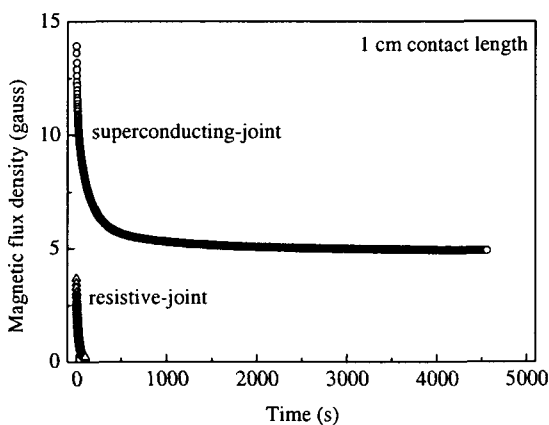


Fig. 1. The decay behaviors of induced magnetic flux density in the coils made by the resistive-joint and superconducting-joint technique

두 코일의 감쇠시정수(time constant)와 접합저항은 식 (1)과 (2)를 사용하여 계산하였다. 코일 1의 감쇠시정수와 접합저항은 식 (1)을 이용하여 28초, $107 \times 10^{-9} \Omega$ 으로 계산되었으며 코일 2의 접합저항은 식 (2)를 이용하여 3000 t 4500 구간에서 $3.21 \times 10^{-11} \Omega$ 으로 계산되었다. 이 결과로부터 코일 2의 접합저항은 코일 1에 비해 약 1/10000 정도 작은 값으로 평가되었다.

그림 2는 접촉 길이가 1, 3, 7 cm인 페루프 코일의 유도자계 곡선이다. 접합부는 상전도 접합방법을 이용하여 제작하였으며 접촉 길이가 증가함에 따라 감쇠 특성이 향상되는 것으로 관찰되었다. 식 (1)로부터 평가된 3, 7 cm인 페루프 코일의 감쇠시정수는 각각 131초, 263초, 접합저항

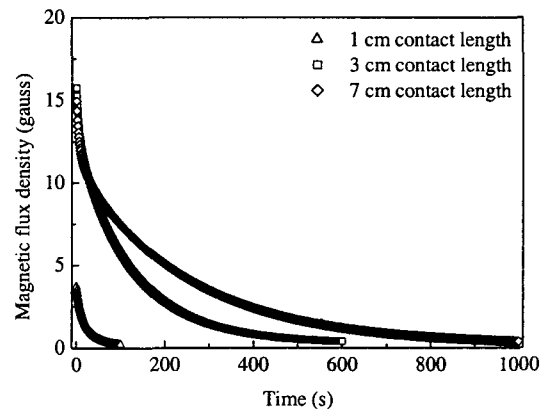


Fig. 2. Variation of decay behaviors of induced magnetic flux density with the contact length in resistive-joint coil

은 $22.9 \times 10^{-9} \Omega$, $11.4 \times 10^{-9} \Omega$ 으로 계산되었다. 주목할 점은 접합부 길이가 1 cm 일 때 초기 유도자계는 다른 접합 길이를 갖는 코일에 비해 상대적으로 작게 관찰 되었다. 이와 비슷한 실험결과는 Tanaka에 의해 보고된 바 있다 [4].

그림 3은 접촉 길이를 달리하여 접합한 선재 및 페루프 코일에서 4 단자법과 자장감쇠법으로 측정된 접합저항을 나타내었다. 4 단자법으로 평가된 접합저항은 접합시료의 V-I곡선에서 옴의 법칙을 따라 선형적으로 증가하는 기울기로부터 계산하였다. 각각의 방법으로 측정된 결과, 접촉 길이가 증가함에 접합 저항값은 작아지나 두 방법에 의해 측정된 저항은 접촉 길이가 증가함에 따라 조금씩 차이를 보인다. 먼저, 4 단자법으로 측정된 결과 접촉길이가 1, 3, 7 cm일 때 접저항은 각각 $128 \times 10^{-9} \Omega$, $54.2 \times 10^{-9} \Omega$, $38.3 \times 10^{-9} \Omega$ 으로 계산되었으며, 자장감쇠법으로 측정된 결과는 $107 \times 10^{-9} \Omega$, $22.9 \times 10^{-9} \Omega$, $11.4 \times 10^{-9} \Omega$ 이다. 이와 같이 4 단자법으로 측정된 결과가 같은 접합 길이에서 상대적으로 크게 측정된 이유는 계측기 노이즈와 측정 한계 때문으로 사료된다.

[참 고 문 헌]

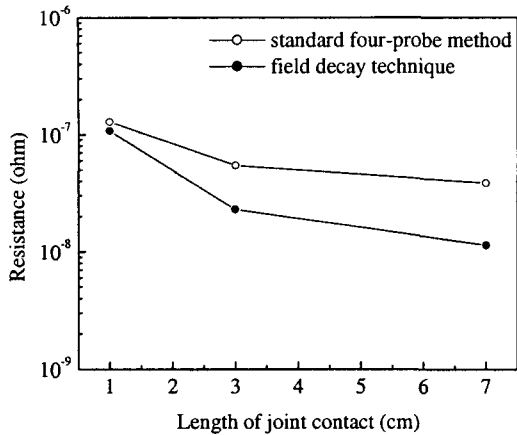


Fig. 3. Comparison of resistance by the various joint measurement method.

3. 결 론

본 연구에서는 자장감쇠법을 이용하여 초전도 페루프 코일의 접합저항을 평가하였다. 상전도 접합방법으로 제작된 페루프 코일의 접합저항은 접촉 길이가 1, 3, 7 cm일 때 각각 $1.07 \times 10^{-7} \Omega$, $2.29 \times 10^{-8} \Omega$, $1.14 \times 10^{-8} \Omega$ 이며 접촉 길이가 증가함에 따라 점차 낮아지는 경향을 보였다. 초전도 접합방법으로 제작된 페루프 코일의 접합저항은 $3.21 \times 10^{-8} \Omega$ 로 상대적으로 낮은 값을 보이며, 이와 같은 접합방법은 영구전류 모드로 운행되는 시스템에 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

4 단자법과 자장감쇠법으로 측정한 접합저항 결과는 접촉 길이가 증가함에 따라 조금씩 차이를 보인다. 이는 계측기의 노이즈와 측정한계 때문으로 판단된다.

- [1] T. Kiyoshi, K. Inoue, M. Kosuge, H. Wada, and H. Maeda, "Current decay evaluation of closed HTS coil circuits", IEEE Trans. on Appl. Superconductivity, vol. 7, pp 877-880, 1997
- [2] J. H. Kim, K. T. Kim, S. H. Jang, J. Joo, S. Choi, W. Nah, H. Kang, T. K. Ko, H. S. Ha, S. S. Oh, K. S. Ryu, and P. Nash, "Measurement of joint properties of Bi(Pb)-Sr-Ca-Cu-O(2223) tapes by field decay technique", preprints of paper no. 2MG04 presented at ASC 2002
- [3] Y. Iwasa, "Superconducting joint between multifilamentary wires 1. Joint-making and joint results", Cryogenics, pp 217-218, April, 1976
- [4] K. Tanaka, A. Ninomiya, T. Ishigohka, and K. Kurahashi, "Measurement of joint resistance of Bi-2223/Ag tapes using one-turn shorted coil", IEEE Trans. on Appl. Superconductivity, vol. 11, pp 3002-3005, 2001

본 연구는 21세기프론티어 연구개발사업인 차세대초전도응용기술개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.