

고온초전도 선재의 접합 및 인덱스손실 평가

김정호, 임준형, 장석현, 김규태, 주진호, 최세용, 나원수, 강형구, 고태국, 하홍수
성균관대학교 금속재료공학부, 성균관대학교 정보통신공학부
연세대학교 전기전자공학과, 한국전기연구원 초전도응용연구그룹

Estimation of joint and index dissipation in HTS tape

Jung Ho Kim, Jun Hyung Lim, Seok Hern Jang, Kyu Tae Kim, Jinho Joo, Seyong Choi, Wansoo Nah, Hyoungku Kang, Tae Kuk Ko, Hong-Soo Ha
School of Metallurgical and Materials Eng., Sungkyunkwan University,
School of information and communication Eng., Sungkyunkwan University,
Department of Electrical and Electronic Eng., Yonsei University,
Applied Superconductivity Lab., Korea Electrotechnology Research Institute

jinho@skku.ac.kr

Abstract - We fabricated two HTS closed coils by using resistive-joint method and the joint resistance of the coil was estimated by field decay technique at 77 K. In addition, we used the Runge-kutta method for the numerical analysis to estimate the decay properties. The joint resistances were evaluated as a function of critical current of HTS closed coil and external field strength of excitation coil.

It was observed that joint resistance was independent of critical current and external field strength. It was estimated that joint resistance was $8.0 \times 10^{-9} \Omega$ to $11.9 \times 10^{-9} \Omega$ for coils of contact length for 7 cm.

1. 서 론

초전도자석 제작 시 초전도 선재간의 접합은 필수적이며 접합부에 대한 성능평가는 반드시 이루어져야 한다. 초전도 선재간의 접합부는 자석 설계치를 만족시킬 수 있는 전기적, 기계적, 열적 요구조건에 부응하여야 하는데, 만약 자석시스템의 운전전류에서 접합저항으로 인한 높은 줄열이 발생된다면 자장의 안정성을 떨어뜨리게 되며, 과도한 냉각을 요구하거나 혹은 상전도 상태로 전이하는 문제를 발생시킬 수 있다. 이와 같이 접합부의 성능평가는 전체 자석시스템의 안정성을 평가하는 가장 기본적인 요소가 되므로 정밀한 측정기법이 요구 된다.

현재까지 알려진 측정기술로는 시료의 전압-전류 특성으로부터 직접 저항을 평가하는 4 단자

법이 있다. 이것은 범용적인 방법이지만, $10^{-10} \Omega$ 수준 이하의 접합저항은 계측기의 측정 한계로 인해서 정확한 평가가 불가능하다. 또한, 초전도 자석의 경우 인덕턴스 성분으로 인하여 큰 유도전압성분이 발생하여 정확하게 솔더에 의한 저항성분만 평가하는 것은 쉽지 않다. 이와 같은 이유로 정확한 접합부의 저항을 평가하기 위해서는 자장감쇠법(field decay technique)이 널리 이용되고 있다 [1]. 이 방법은 초전도 선재를 페루프형태로 제작하여 회로내에 유도된 전류의 감쇠 현상을 홀소자나 감지코일 등으로 장시간 측정을 하여 접합저항을 간접적으로 평가하는 방법이다.

본 논문에서는 AMSC사의 55심 선재와 자체 제작한 19심 선재를 사용하여 페루프 코일을 제작하여 접합저항을 평가하였다. 평가는 자장감쇠법을 이용하였으며, 측정 시 발생하는 변수를 체계적으로 검증하고 평가하기 위해 임계전류가 상이한 선재로 페루프를 제작하여 외부자계크기를 변화시키면서 측정하였다. 이 결과는 수치해석결과와도 서로 비교 평가되었다.

2. 본 론

2.1 이론적 배경

자장감쇠법은 기본적으로 자기유도 현상을 이용한 것이다. 측정 장치는 변압기와 유사한 원리로 1차 측 역할을 하는 자계 인가용 여자 코일과 2차 측 역할을 하는 페루프 코일로 구성되어 있으며 이들은 서로 자기적으로 결합된 상태이다. 접합저항 측정용 장치를 등가회로로 그림 1에 도시하였다. 그림의 좌측은 자계를 발생시키는 여자코일이며, 우측은 초전도 페루프를 의미한다. 페루프에서는 시간에 따른 유도 전류의 감소를

측정하기 위해서 중심부에 홀소자를 설치하였으며, 열적 쿨링을 통한 페회로의 초전도성과 상전도성 간의 스위칭을 위해 히터를 설치하였다. 그

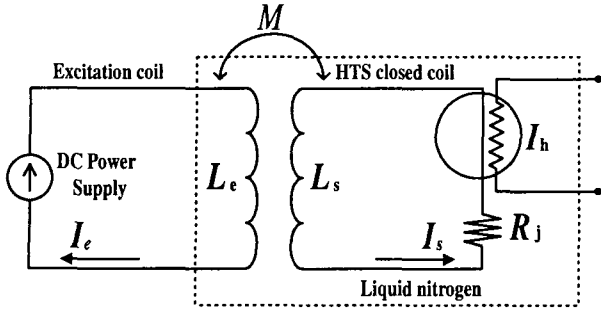


Fig. 1. Schematic of equivalent circuit of joint resistance measurement.

림에서 L_e , I_e 는 각각 여자 코일의 인덕턴스와 여자 전류를, L_s , I_s 는 각각 초전도 페루프의 인덕턴스와 유도 전류를 나타낸다. R_j 는 페회로의 접합저항을 I_h 는 히터 전류를 의미한다. 전압방정식으로부터 그림 1의 등가회로는 다음과 같은 수식으로 유도될 수 있다 [2].

$$L_s \frac{dI_s}{dt} + I_s R + M \frac{dI_e}{dt} = 0 \quad (1)$$

여기서, R 은 접합저항(R_j)을 포함하는 초전도 페회로 코일의 전체저항이다.

만약, 초전도 페회로 코일의 전체저항이 일정하다면 식 (1)에 의해서 정확히 전류감쇠특성을 예측할 수 있다. 그러나 초전도 코일의 저항은 접합저항과 인덕스저항으로 이루어져 있으며 인덕스 저항은 전류에 따른 비선형 특성을 보이기 때문에 전압방정식은 식 (2)와 같이 표현되어야 한다.

$$L_s \frac{dI_s}{dt} + I_s (R_j + R_n(I_s)) + M \frac{dI_e}{dt} = 0 \quad (2)$$

여기서, R_n 은 코일의 인덕스저항으로 옴의 법칙과 power-law에 의해 다음과 같이 표현된다.

$$R_n(I_s) = \frac{V_c}{I_c} \left(\frac{I_s}{I_c} \right) \quad (3)$$

식 (2)는 수치해석기법의 일종인 Runge-kutta 법을 이용하여 해석하였다.

2.2 자장감쇠법

초전도 페루프의 접합저항은 자장감쇠법을 이용하여 측정하였다. 그림 2에서는 측정용 장치의 동작을 도시하였으며 그 상세한 순서를 기술하면 다음과 같다. 첫째, 히터에 전류(I_h)를 공급하여 초전도 페루프 코일을 상전도 상태로 만든다 (1). 둘째, 여자 전류(I_e)를 일정 크기까지 증가

시킨다 (2). 셋째, 외부 자계가 목표치에 도달하면 일정시간 후에 히터 전류를 제거하여 페루프를 초전도 상태로 만든다 (3). 넷째, 여자 전류를 소거하여 외부자계를 0으로 한다. (4).

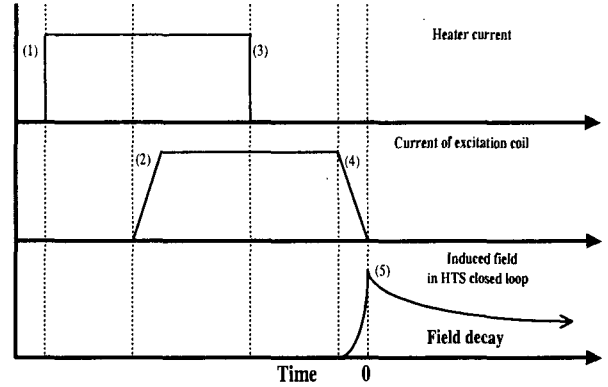


Fig. 2. Schematic of operating procedures of field decay technique.

다섯째, 초전도 페루프의 유도 전류(I_s)에 대한 자계 감쇠를 측정한다 (5).

위와 같은 동작순서에 의해 초전도 페루프에 발생된 유도 전류는 자계를 발생시키고, 이 값들은 RL 회로로부터 식 (4)와 같이 표현할 수 있다. 여기서 $B(t_0)$ 은 초전도 페루프에 유도된 초기자장값, R 은 접합저항과 인덕스 저항을 포함하는 페회로 시스템의 저항이다. 또한 L 은 페루프의 인덕턴스이며 t 는 시간변수를 의미한다.

$$B(t) = B(t_0) \exp\left[-\frac{R}{L} t\right] \quad (4)$$

2.3 초전도 페루프코일의 제작

접합저항을 평가하기 위해 두 종류의 선재로 페루프 코일은 제작하였으며 더블팬케이크형태로 감아 제작하였다. 각 권선 간의 절연은 캡톤 필름을 사용하였으며 코일의 접합부 형상은 기도형태(praying-hands type)로 하여 Pb-Sn솔더와 플럭스를 사용하였다. 접합부의 길이는 7 cm로 제작하였다. 표 1과 2는 각각 실험에 사용된 초전도 선재와 페루프 코일의 제원을 나타내었다.

Table 1. Parameters of superconductor tapes

	Tape 1	Tape 2
Thickness [mm]	0.21	0.26
Width [mm]	4.10	3.40
Critical current [A] @ 77 K	125.0	21.5

Table 2. The main parameters of coils

	Coil 1	Coil 2
Superconductor tape	Tape 1	Tape 2
I.D. [mm]	45	45
O.D. [mm]	49.05	49.65
Height [mm]	8.25	6.90
Total turns	10	10
Magnetic constant [gauss/A]	2.64	2.62
Critical current [A] @ 77 K	58.0	11.6
Self inductance (μH)	7.10	7.32
Mutual inductance (μH)	49.2	50.7

2.4 접합저항 평가

그림 3은 두 종류의 선재로 제작한 페루프 코일에서의 유도전류 감쇠곡선과 수치해석으로 계산한 결과를 같이 도시하였다. 각 코일에서의 유도전류는 자계로 표현되었다. 그림에서 보는 바와 같이 코일 1과 2에서 시간에 따라 자계는 지수적으로 감소하나 초기 자계는 64.7 gauss와 18.1 gauss 로 각각 다르게 나타났다. 후에 언급되겠지만 이러한 초기 자계의 차이는 페루프의 임계전류와 연관이 있는 것으로 사료된다. 두 코일의 감쇠시정수(time constant)와 접합저항은 식 (4)를 이용하여 계산하였다. 계산결과 감쇠시정수는 코일 1과 2에서 각각 892 초와 615 초이었으며, 따라서 접합저항은 각각 $8.0 \times 10^{-9} \Omega$ 와 $11.9 \times 10^{-9} \Omega$ 로 계산되었다.

본 측정 장치에서 외부자계에 의해 초전도 페루프 코일에 유도되어지는 전류는 변압기의 원리와 마찬가지로 1 차측 코일의 여자 전류에 의해 유도되어질 수 있는 2 차측의 전류값으로써, 다음 식에 의해서 계산할 수 있다.

$$I_2 = \frac{M}{L} I_1 \quad (5)$$

여기서, I_1 는 여자코일 방전 후에 초전도 페루프에 발생된 초기 유도 전류, M 은 두 코일간의 상호인덕턴스, L 은 초전도 페루프코일의 인덕턴스, I_e 는 여자코일의 입력 전류이다. 식 (5)를 이용하면 두 종류의 초전도 페루프에 유도될 초기 전류를 예측할 수 있다. 100 gauss의 외부자계를 인가할 때($I_e=3.5$ A), 각각의 페루프에 유도될 전류는 식 (5)에 의해서 각각 24.3 A, 24.2 A 이었으며, 이 전류를 자석상수로부터 자계로 환산하였을 경우 64.0 gauss, 63.5 gauss가 발생되게 된다. 이 계산 결과를 실측값과 비교하였을 때 코일 1의 경우 계산값은 그림 3의 실측치인 64.7 gauss와 거의 유사한 값을 갖는다. 그러나 코일 2의 측정 결과는 18.1 gauss로 계산값보다 작게 측정되었다.

이로부터 식 (5)를 이용하여 예측된 결과들은 초전도 페루프 코일의 임계전류에 따라서 다른 경향을 보임을 알 수 있다. 외부 자계에 의해 유도된 전류가 임계전류보다 작을 때, 즉 코일 1의 경우에는, 식 (5)에 의한 계산결과와 실측치는

유사하다. 그러나 유도전류가 임계전류보다 큰 코일 2와 같은 경우에는 계산에 의해 예측된 값과 실측값에는 상당한 차이를 보인다. 이 결과로부터 외부 자계에 의해 발생하는 전류가 페루프의 임계전류값보다 작은 경우 감쇠를 시작하는 초기값을 정확히 예측할 수 있으며, 페루프 코일에 유도되는 초기전류값은 각 코일의 형상뿐만 아니라 페루프의 임계전류와도 연관이 있는 것으로 사료된다.

이와 같은 결과로부터 식 (5)에 의해서는 페루프 코일의 초기값을 예측할 수 없으며 이를 바탕으로 정확한 자장감쇠 특성도 예측하기 어렵

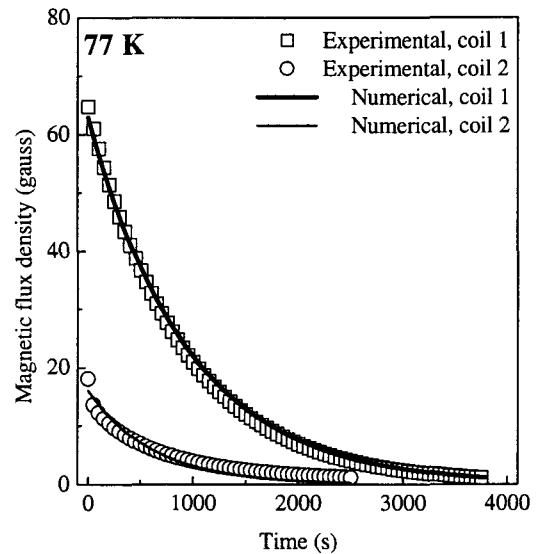


Fig. 3. The decay behavior of induced current in the coils.

다. 결과적으로 수치해석기법의 일종인 Runge-kutta법을 도입하였으며 정확한 예측을 위해서 초전도의 인덱스 특성을 고려하였다. 이 방법은 그림 2에 설명된 실험 순서와 동일한 과정을 통해서 해석되었다. 이 방법에 의해 예측된 초기값 및 자장감쇠특성은 실제 측정 결과와도 서로 잘 일치하였으며 이는 초전도의 인덱스특성이 초전도 자석의 영구전류모드 시 큰 영향을 미치는 것을 간접적으로 시사한다 [3].

표 3은 외부자계 크기에 따른 페루프 코일에서의 초기 유도자계와 접합저항을 나타내었다. 표에서 초기 유도자계는 두개의 코일에서 각기 다른 특성을 보이고 있다. 먼저, 코일 1의 경우 외부 자계가 증가함에 따라 초전도 페루프에 유도된 자계는 선형적으로 증가하는 경향을 보이고 있으나, 코일 2의 경우에는 선형적인 증가현상이 후 약 30 gauss 이상의 외부자계가 가해질 경우 페루프의 유도자계는 약 15~18 gauss에서 일정하게 유지하는 경향을 보이고 있다. 이와 같은 결과는 각 초전도 페루프의 임계전류와 자석상수간의 관계를 미루어 볼 때 설명되어질 수 있다.

표 2에서 언급했던 것과 같이 1번 코일의 임계 전류는 58.0 A로 이때 발생하는 자계는 153 gauss 정도이다. 또한 2번 코일의 임계전류는 11.6 A로 이 전류에서는 30 gauss 의 자계를 발생시킨다. 즉, 코일 1에서는 외부자계 150 gauss 인가 시 약 35 A(92 gauss)의 유도전류가 발생되며 이는 페루프 임계전류의 60% 수준이다. 반면에 코일 2의 경우에는 약 47 gauss 이상의 외부자계 인가 시 임계전류 11.6 A를 넘어서는 전류가 유도되어 외부자계가 증가하더라도 유도자계는 더 이상 증가하지 못하고 일정수준에서 유지하는 현상을 보인다. 이는 임계값 이상의 전류가 흐를 때 초전도 선재는 켄치되어 상전도화되

Table 3. Dependence of the initial magnetic flux density and joint resistance in closed loop on external field strength.

External field (gauss)	Coil 1		Coil 2	
	Initial B	R (nΩ)	Initial B	R (nΩ)
11.9	9.8	8.2	5.9	11.5
26.6	19.4	8.2	15.3	12.3
35.5	25.1	8.2	15.6	12.6
50.2	34.4	8.0	15.8	12.6
76.7	50.8	8.0	16.7	10.0
100.4	100.4	8.0	18.1	11.9
150.5	93.4	7.8	16.5	12.1

며 이때 급속하게 저항이 증가하게 된다. 임계치 이상의 전류는 그 저항성분으로 인하여 급속히 감소되고 임계치 이하의 전류만 지수함수적인 감소현상을 보이게 되는 것으로 사료된다. 그러나 이러한 경향과는 달리 접합저항은 표 3에서 보듯이 코일 1과 2에서 약 $8.0 \times 10^{-9} \Omega$ 와 $11.9 \times 10^{-9} \Omega$ 로 외부자계 크기와 임계전류와는 무관하게 일정한 값을 보인다. 또한, 두 코일간의 접합저항 차이는 각각 선재의 폭길이를 감안한다면 차이가 없는 것으로 사료된다.

3. 결 론

본 연구에서는 자장감쇠법을 이용하여 초전도 선재의 접합저항을 평가하였으며 접합부의 구현을 위해서 임계 전류가 상이한 AMSC사의 선재와 자체 제작한 19심 선재를 이용하였다. 접합부는 상전도 접합방법을 이용하였으며, Pb-Sn솔더와 플럭스를 사용하였다. 두 종류의 선재로 제작된 페루프에서 임계전류와 외부자계크기변수에 의해 접합저항을 평가하였을 때 $8.0 \times 10^{-9} \sim 11.9 \times 10^{-9} \Omega$ 로 큰 차이를 보이지 않았다. 이는 선재간의 접합저항은 삽입재료의 비저항에 의존하기 때문으로 사료된다. 또한, 이 실험결과들은 수치해석기법인 Runge-kutta법을 통해서 비교해 보았으며 그 결과 유사함을 확인할 수 있었다.

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

[참 고 문 헌]

- [1] 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", IEEE Trans. on Appl. Superconductivity, vol. 13, pp 2992-2995, 2003
- [2] 안두수 외, 회로이론, 북두출판사
- [3] Y. Iwasa, "Microampere flux pumps for superconducting NMR magnets Part 1: basic concept and microtesla flux measurement", Cryogenics, vol. 41, pp 385-391, 2001