

# Measurement of Joint Resistance of $(\text{Bi,Pb})_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x/\text{Ag}$ Superconducting Tape by Field decay Technique

Jung Ho Kim<sup>a</sup>, Seung Muk Lee<sup>b</sup>, Jinho Joo<sup>\*.b</sup>

<sup>a</sup> *Institute for Superconducting and Electronic Materials, University of Wollongong, Squires Way, North Wollongong, NSW 2500, Australia*

<sup>b</sup> *School of Advanced Materials Science and Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon, Gyeonggi-do, Korea*

(Received 20 July 2012; revised 31 July 2012; accepted 10 August 2012)

## 자장감쇠법을 이용한 $(\text{Bi,Pb})_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x/\text{Ag}$ 초전도선재의 접합저항 측정

김정호<sup>a</sup>, 이승묵<sup>b</sup>, 주진호<sup>\*.b</sup>

### Abstract

We fabricated a closed coils by using resistive-joint method and the joint resistance of the coils were estimated by field decay technique in liquid nitrogen. We used the Runge-kutta method for the numerical analysis to calculate the decay properties. The closed coil was wound by  $(\text{Bi,Pb})_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x/\text{Ag}$  tape. Both ends the tape were overlapped and soldered to each other. The current was induced in a closed coils by external magnetic flux density. Its decay characteristic was observed by means of measuring the magnetic flux density generated by induced current at the center of the closed coil with hall sensor. The joint resistance was calculated as the ratio of the inductance of the loop to the time constants. The joint resistances were evaluated as a function of critical current of loop, contact length, sweep time, and external magnetic flux density in a contact length of 7 cm.

It was observed that joint resistance was dependent on contact length of a closed coil, but independent of critical current, sweep time, and external magnetic flux density. The joint resistance was measured to be higher for a standard four-probe method, compared with that for the field decay technique. This implies that noise of measurement in a standard four-probe method is larger than that of field decay technique. It was estimated that joint resistance was  $8.0 \times 10^{-9} \Omega$  to  $11.4 \times 10^{-9} \Omega$  for coils of contact length for 7 cm. It was found that 40Pb/60Sn solder are unsuitable for persistent mode.

**Keywords :**  $(\text{Bi,Pb})_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$  superconductor tape, Field decay technique, Index n, Joint resistance, Standard four-probe method

\*Corresponding author. Fax : +82 31 290 7358

e-mail : jinho@skku.edu

### I. Introduction

일반적으로 1 GHz 이상의 고 자장용 NMR

마그네트에서는  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_1\text{Cu}_2\text{O}_8$  혹은  $(\text{Bi,Pb})_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$  고온초전도전체가 내부코일로 많이 사용되고 있으며, 영구전류모드로 운행이 된다 [1]. 이렇게 영구전류모드로 운행되는 초전도 마그네트 시스템의 제작 시 초전도 선재간의 접합은 중요한 핵심기술이며 접합부의 성능평가는 시스템 설계 단계에서 선행되어야 한다 [2]. 특히, 각 단말간의 접합부는 마그네트 설계치를 만족시킬 수 있는 전기적, 열적, 기계적 요구조건을 충족시켜야 하며, 만일 마그네트 시스템의 운행전류에 의해 접합부에서 국부적인 열적, 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 자계안전성(0.1 ppm/hr)을 요구한다. 또한 고균등 및 고자장을 필요로 하는 시스템의 특성상 수 개에서 수십 개의 마그네트가 조립되어야 하며 또한 초전도 스위치(persistent current switch; PCS)와 연결을 통해 영구전류모드로 운행하여야 한다 [3]. 이 같은 시스템 제작 시 단말부에서는 초전도 선재간 혹은 초전도-금속도체간의 접합이 필요하며 이때 영구전류모드 구현을 위해서 시스템의 전체 접합저항은 일반적으로  $10^{-12} \Omega$  이하의 값이 요구된다. 그러므로 여러 가지 접합 방법 중에서 설계치를 만족시키는 우수한 접합 방법을 선택하여야 하며, 접합부의 안전성 평가를 위한 정밀한 측정기술이 필요하다. 현재까지 알려진 측정기술로는 시료의 전압-전류 특성으로부터 저항을 측정하는 4 단자법(standard four-probe method)이 있다. 이것은 범용적인 방법이지만,  $10^{-10} \Omega$  수준 이하의 접합저항은 계측기의 노이즈나 측정 한계로 인해서 정확한 평가가 불가능하기 때문에 자장감쇠법(field decay technique)을 이용하는 것이 일반적인 접근 방법이다 [4]. 이 방법은 해당 시료를 페루프(closed loop) 형태로 제작하여 유도된 전류의 감쇠 현상을 홀 소자나 감지코일 등으로 장시간 측정을 하여 접합저항을 간접적으로 측정하는 방법이다.

현재까지 다심  $(\text{Bi,Pb})_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$  선재의 접

합공정과 접합저항 측정법에 대한 연구는 완전히 확립되지 않았으며 소수 그룹에서만 국한되어 연구되어왔다 [5, 6]. 또한 접합기술의 응용 가능성과 중요성을 견주어 볼 때 페루프의 임계전류, 스위프시간(sweep time), 외부자계크기 등과 같은 여러 변수에 따른 체계적인 연구가 부족한 실정이며 이에 대한 정확한 측정법이 연구되어야 한다.

본 연구에서는  $(\text{Bi,Pb})_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$  선재를 이용하여 시스템 구성 시 필연적으로 수반되는 접합저항을 측정 및 평가하였다. 접합부의 구현은 American Superconductor™(AMSC)사의 55심 선재와 자체 제작한 19심 선재를 사용하여 초전도 페루프를 구성하였으며 접합저항 측정은 기본적으로 자장감쇠법을 이용하였다. 측정 시 발생하는 변수를 체계적으로 검증하고 평가하기 위하여 임계전류가 상이한 페루프를 제작하여 스위프 시간과 외부자계크기를 변화시키면서 측정하였으며, 측정된 결과들은 4 단자 법으로 측정된 결과와도 서로 비교 검토 되었다.

## II. Experimental details

### II-I. 측정장치의 개요

자장감쇠법은 기본적으로 자기유도 현상을 이용한 것이다. 측정 장치는 변압기와 유사한 원리이며 변압기의 1차 측 역할을 하는 자계인가용 여자 코일(excitation coil)과 2차 측 역할을 하는 초전도 페루프 코일(HTS closed loop)로 구성되어 있고 이들은 서로 자기적으로 결합된 상태이다. 접합저항 측정용 장치를 등가회로로 Fig. 1에 도시하였다. 그림의 좌측은 자계를 발생시키는 여자코일이며, 우측은 초전도 폐회로를 의미한다. 폐회로에서는 시간에 따른 유도전류의 감쇠를 측정하기 위해서 중심부에 홀소자를 설치하였으며, 열적 켄칭을 통한 폐회로의 초전도성과 상전도성 간의 스위칭을 위해 히터를 설치하였다. 그림에서  $L_e$ ,  $I_e$ 는 각각 여자 코일의 인덕턴스와 여자 전류를,  $L_s$ ,  $I_s$ 는 초전도 페루프의 인덕턴스 및 유도 전류를 나타낸다.  $R_j$ 는 폐회로의 접합저항을  $I_h$ 는 히터 전류를 의미한다. 전압방정식으로부터 Fig. 1의 등가회로는 다음과 같은 수식으로 유도될 수

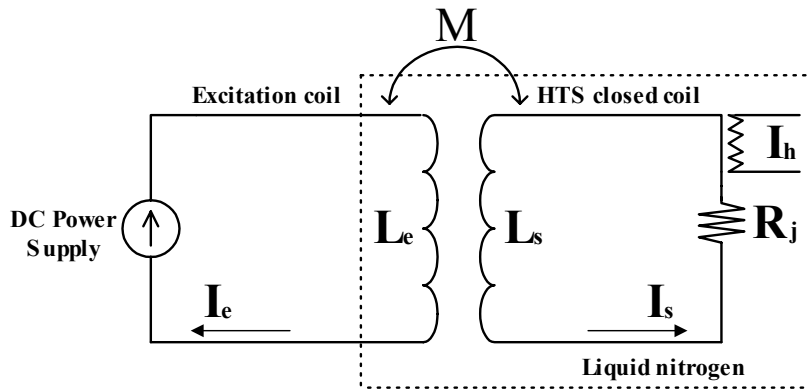


Fig. 1. Schematic equivalent circuit of joint resistance measurement.

있다.

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

여기서  $R_n$ 은 인덱스저항이며  $M$ 은 상호인덕턴스이다.

Table 1은 실험에 사용된 초전도 선재의 제원을 나타내었으며, 선재 1과 2는 각각 AMSC사에서 제작된 초전도 선재와 자체 제작된 19심 초전도 선재이다.

## II-II. 여자 코일의 제작

초전도 페루프에 외부 자계를 인가하기 위한 여자코일을 제작하였으며 코일은 에나멜 선을 이용하여 FRP 보빈에 권선하였다. 여자코일은 초전도 페루프가 위치한 곳에 단위 전류 당 30 gauss를 인가할 수 있도록 설계되었고 이때 여자 코일의 총 권선수는 300 회이다. Fig. 2는 설

계치로 예측된 여자 코일의 자속 밀도 분포를 도시하였으며, 이 결과는 1 A의 여자 전류에서의 수치해석 결과이다. 해석 방법은 유한요소법(FEM)을 사용하였으며, 축대칭 형태로 모델링하여 수행하였다. 여자 코일의 자석상수(magnetic constant)는 28 gauss/A 로 측정되어 설계치에 거의 근접하였다. 또한 설계 시 여자 코일의 인덕턴스는 5.31 mH였으며, 여자 코일의 제작 후 L.C.R. 미터를 이용하여 측정한 인덕턴스는 5.27 mH로 설계치와 거의 유사하였다.

## II-III. 초전도 페루프 코일의 제작

접합저항을 평가하기 위한 초전도 페루프 코일은 Table 1에 도시한 19심 및 55심 선재를 사용하였으며, 페루프는 G-10 보빈에 더블판케이크(double pancake) 형태로 감아 제작하였다. 각 권선 간의 절연은 25  $\mu$ m 두께의 캡톤 필름을

Table 1. Parameters of superconductor tape.

	Tape 1	Tape 2
Thickness (mm)	0.21	0.26
Width (mm)	4.10	3.40
Critical current (A)	125	21.5
Number of filaments	55	19
Manufacturer	American superconductor	SKKU univ.

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) @77.3 K	58.0	11.6
Self inductance (H)	7.10	7.32
Mutual inductance (H)	49.2	50.7

사용하였다. 초전도 페루프 코일의 접합부 형상은 기도형태(praying-hands type)로 하였으며 접합부의 접착은 40Pb/60Sn 솔더와 플럭스를 사용하였다 [7]. Table 2와 Fig. 3은 실험에 사용된 초전도 페루프 코일의 제원과 형상이다. 초전도 페루프 코일 1과 2는 각각 AMSC사의 55심 선재(선재 1)와 19심 선재(선재 2)로 제작된 것이다.

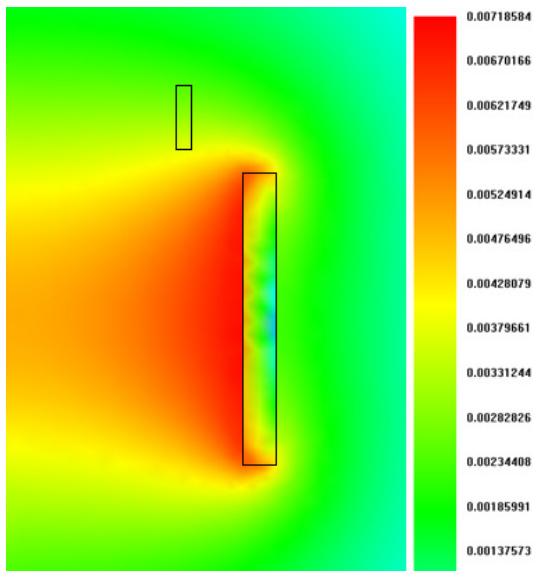


Fig. 2. Magnetic flux density distribution generated by excitation coil.

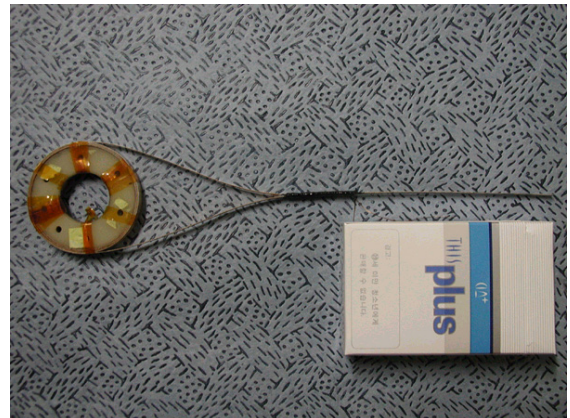


Fig. 3. Photograph of a HTS closed loop.

#### II-IV. 접합저항 측정

초전도 페루프의 접합저항은 자장감쇠법을 이용하여 측정하였다. 전술한 바와 같이 자장감쇠법의 주요 원리는 1 차 코일에서의 자계로 인해 2 차 회로 측에 유도된 전류의 감쇠를 측정하여 이로부터 접합 저항을 계산하는 것이다. Fig. 4에서는 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 증가시킨다 (2). 셋째, 외부 자계가 목표치에 도달하면 일정시간 후에 히터 전류를 제거하여 페루프를 초전

도 상태로 만든다 (3). 넷째, 여자 전류를 소거하여 외부자계를 0으로 한다. (4). 다섯째, 초전도 페루프의 유도 전류( $I_i$ )에 대한 자계 감쇠를 측정한다 (5).

초전도 페루프에 발생된 유도 전류는 자계를 발생시키고, 이 값들은 RL 회로로부터 식 (2)와 같이 표현할 수 있다. 여기서  $B(t_0)$ 은 초전도 페루프에 유도된 초기자장 값, R은 접합저항과 인덱스 저항(index n resistance)을 포함하는 폐회로 시스템의 저항이다. 또한 L은 페루프의 인덕턴스이며 t는 시간변수를 의미한다.

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

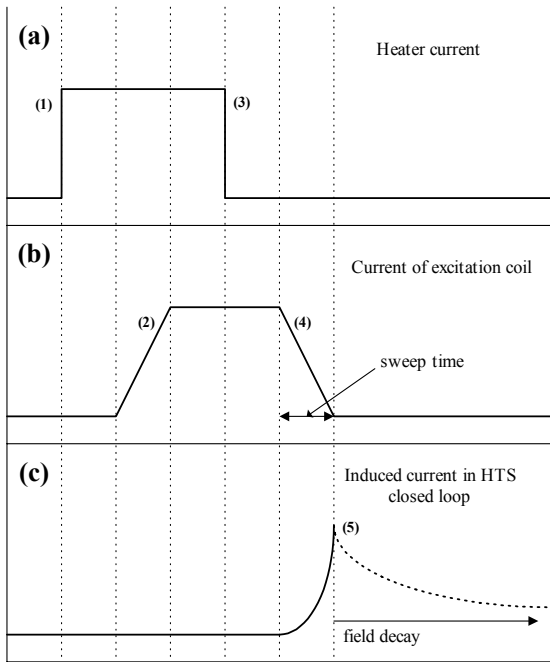


Fig. 4. Sequential switch actions of field decay technique ((a) heater current, (b) current of excitation coil, and (c) induced current in HTS closed loop).

### III. Results and Discussions

Fig. 5(a)는 두 종류의 선재로 제작한 초전도 페루프 코일에서의 유도전류 감쇠곡선이며, 유도 전류는 자계로 표현되었다. 그림에서 보는 바와 같이 페루프 1과 2에서 시간에 따라 자계

는 지수적으로 감소하나 초기 자계는 64.73 gauss와 18.07 gauss로 각각 다르게 나타났다. 후에 언급되겠지만 이러한 초기 자계의 차이는 페루프의 임계전류와 연관이 있는 것으로 사료된다.

두 코일의 감쇠시정수(time constant)와 접합저항은 식 (2)를 이용하여 계산하였다. 계산결과 감쇠시정수는 코일 1과 2에서 각각 892 초와 615 초이었으며, 따라서 접합저항은 각각  $7.96 \times 10^{-9} \Omega$ 와  $11.9 \times 10^{-9} \Omega$ 로 계산되었다. 이 결과로부터 접합저항은 페루프의 임계전류에 영향을 받지 않는 것으로 사료되며 Iwasa에 의해 보고된 바와 같이 다음 식으로 표현될 수 있다 [8].

$$R = R_{ct}/A_{ct} \quad (3)$$

여기서  $R_{ct}$ 는 접촉저항(contact resistance,  $\Omega m^2$ ),  $A_{ct}$ 는 선재간의 접촉부 면적이다. 식 (3)에 의하면 접합부의 저항을 최소화하기 위해서는 선재간의 넓은 접촉부 면적이 있어야 한다는 것을 시사한다.

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.

$$I_i = \frac{M}{L} I_e \quad (4)$$

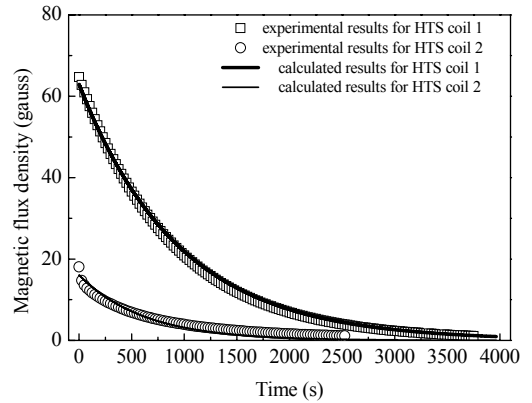
여기서  $I_i$ 는 여자코일 방전 후에 초전도 페루프에 발생된 초기 유도 전류, M은 두 코일간의 상호인덕턴스, L은 초전도 페루프코일의 인덕턴스,  $I_e$ 는 여자코일의 입력 전류이다. 식 (4)를 이용하면 두 종류의 초전도 페루프에 유도될 초기 전류를 예측할 수 있다. 100 gauss의 외부자계를 인가할 때( $I_e=3.5$  A), 각각의 페루프에 유도될 전류는 식 (4)에 의해서 각각 24.25 A, 24.24 A이었으며, 이 전류를 자석상수로부터 자계로 환산하였을 경우 64.03 gauss, 63.50 gauss가 발생되게 된다. 이 계산 결과를 실측값과 비교하였을 때 코일 1의 경우 계산값은 Fig. 5의 실측치인 64.73 gauss와 거의 유사한 값을 갖는다. 그러나 코일 2의 측정 결과는 18.07 gauss로 계

산 값보다 작게 측정되었다.

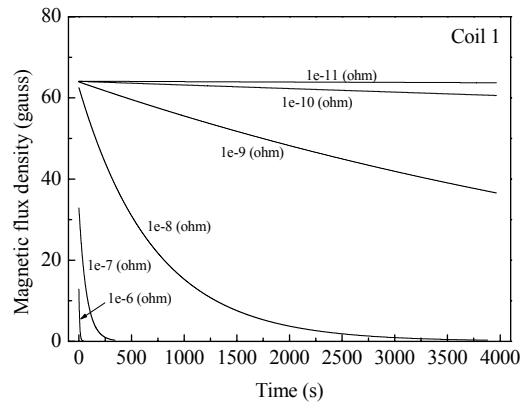
여기서  $I_1$ 는 여자코일 방전 후에 초전도 페루프에 발생된 초기 유도 전류,  $M$ 은 두 코일간의 상호인덕턴스,  $L$ 은 초전도 페루프코일의 인덕턴스,  $I_c$ 는 여자코일의 입력 전류이다. 식 (4)를 이용하면 두 종류의 초전도 페루프에 유도될 초기 전류를 예측할 수 있다. 100 gauss의 외부 자계를 인가할 때( $I_c=3.5$  A), 각각의 페루프에 유도될 전류는 식 (4)에 의해서 각각 24.25 A, 24.24 A이었으며, 이 전류를 자석상수로부터 자계로 환산하였을 경우 64.03 gauss, 63.50 gauss가 발생되게 된다. 이 계산 결과를 실측값과 비교하였을 때 코일 1의 경우 계산값은 Fig. 5의 실측치인 64.73 gauss와 거의 유사한 값을 갖는다. 그러나 코일 2의 측정 결과는 18.07 gauss로 계산 값보다 작게 측정되었다.

이로부터 식 (4)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 (4)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.

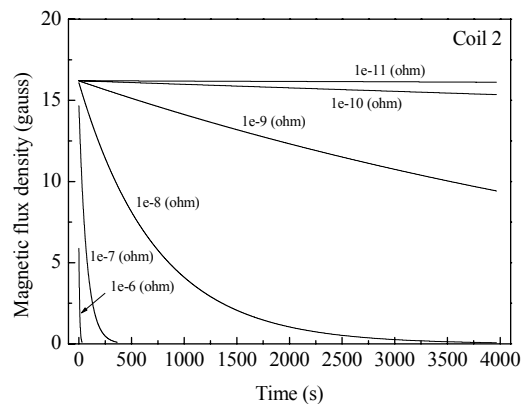
Fig. 5 (a)에서는 측정된 결과와 식 (1)의 수치 해석 결과를 함께 도시하였다. Fig. 1에 해당하는 전압방정식으로부터 유도된 식 (1)은 수치 해석기법의 일종인 Runge-kutta법을 통해서 Fig. 4에 설명된 실험 순서와 동일한 과정을 통해서 해석되었다 [9]. 그림에서 보는 바와 같이 각각의 초전도 코일에서 예측된 자장은 측정된 결과와 잘 일치하였다. 이를 바탕으로 임의의 접합저항에 대한 초전도 페루프에서의 유도 자장 감쇠 특성을 예측하였으며 이를 Fig. 5 (b)에 도시하였다. 접합 저항의 크기에 따라 유도된 전류 혹은 자계의 감쇠 양상은 전혀 다른 특성을 보이고 있으며, 영구전류모드로 동작되는 마그네트 시스템에는 낮은 저항을 갖는 접합기술이



(a)



(b)

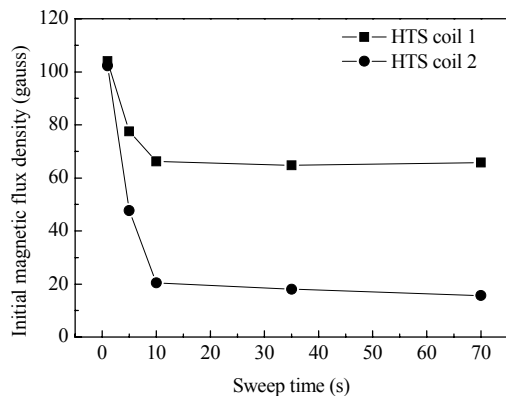


(c)

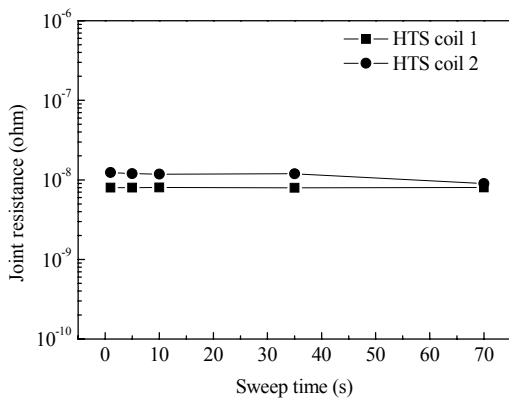
Fig. 5. (a) Experimental results and (b) and (c) calculation results obtained decay behaviors of a induced magnetic flux density in the coils (external magnetic flux density 100 gauss, sweep time 35 s).

요구됨을 미루어 짐작할 수 있다.

Fig. 6은 여자코일의 스위칭시간에 따른 페루프 코일의 초기 유도자계와 접합저항을 나타내었다. 외부 자계는 Fig. 4의 (b)와 같은 형태로 인가된 후 제거된다. Fig. 6(a)에서와 같이 스위칭 시간(sweep time,  $t_s$ )에 따라 측정된 초기 유도자계는 일정 수준까지 감소를 보인 후 유지한다. 각각의 스위칭시간에 따른 유도자계곡선들을 관찰한 결과  $t_s$ 가 10초 미만인 경우에는 초기에 급격한 감소 이후 지수적으로 감소하며 이와 대조적으로 10초 이상인 경우에는 전 시간에 걸쳐 지수적으로 감소하는 경향을 보였다. Fig. 6(a)와 같이 초기 유도자계값이 스위칭시간에 영향을 받는 것은 이러한 시변 유도자계 거동과



(a)



(b)

Fig. 6. Dependence of the (a) initial magnetic flux density and (b) joint resistance in closed loop on sweep time (external magnetic flux density : 100 gauss).

일부 연관이 있는 것으로 추측되나 추후 더 자세한 연구가 필요할 것으로 판단된다 [10].

Fig. 6(b)는 측정된 자계 감쇠곡선에서 평가된 접합저항을 도시하였다. 각 코일에서의 접합저항은  $8.0 \times 10^{-9} \Omega$ 과  $11.4 \times 10^{-9} \Omega$ 으로 스위칭시간에 관계없이 일정하며, 두 코일 간의 접합저항 또한 큰 차이를 보이지 않는다. 접합저항이 스위칭시간에 따라 차이가 거의 없는 이유는 유도자계 곡선으로부터 초기 급격한 감소부분을 제거한 후 계산하기 때문이며 [11], 두 코일간의 접합저항이 유사한 이유는 삽입재료의 저항값에만 의존하고 페루프의 임계전류 변수에는 무관하기 때문이다.

Fig. 7은 외부자계 크기에 따른 페루프 코일에서의 초기 유도자계와 접합저항을 나타낸 그림이다. Fig. 7(a)에서 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 증가현상 이후 약 30 gauss 이상의 외부자계가 가해질 경우 페루프의 유도자계는 약 15~18 gauss에서 일정 유지하는 경향을 보이고 있다. 이와 같은 결과는 각 초전도 페루프의 임계전류와 자석상수간의 관계를 미루어 볼 때 설명되어질 수 있다.

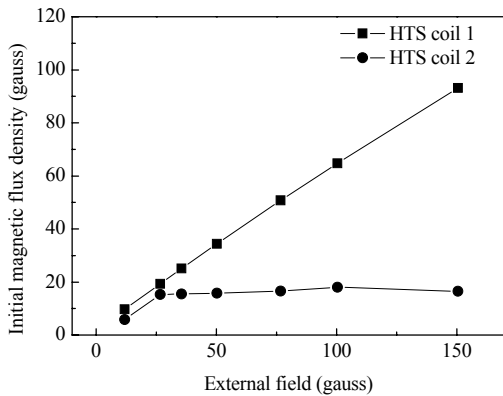
Table 2에서 언급했던 것과 같이 1번 코일의 임계 전류는 58.0 A로 이때 발생하는 자계는 153 gauss 정도이다. 또한 2번 코일의 임계전류는 11.6 A로 이 전류에서는 30 gauss의 자계를 발생시킨다. 즉, 코일 1에서는 외부자계 150 gauss 인가 시 약 35 A(92 gauss)의 유도전류가 발생되며 이는 페루프 임계전류의 60% 수준이다. 반면에 코일 2의 경우에는 약 47 gauss 이상의 외부자계 인가 시 임계전류 11.6 A를 넘어서는 전류가 유도되어 외부자계가 증가하더라도 유도자계는 더 이상 증가하지 못하고 일정수준에서 유지하는 현상을 보인다. 이는 임계값 이상의 전류가 흐를 때 초전도 선재는 퀵치되어 상전도화되며 이때 급속하게 저항이 증가하게 된다. 임계치 이상의 전류는 그 저항성분으로 인하여 급속히 감쇠되고 임계치 이하의 전류만 지수함수적인 감쇠현상을 보이게 되는 것으로 사료된다. 그러나 이러한 경향과는 달

리 접합저항은 Fig. 7(b)에서 보듯이 코일 1과 2에서 각각  $8.0 \times 10^{-9} \Omega$ 와  $11.85 \times 10^{-9} \Omega$ 로 외부자계 크기와 임계전류와는 무관하게 일정한 값을 보인다.

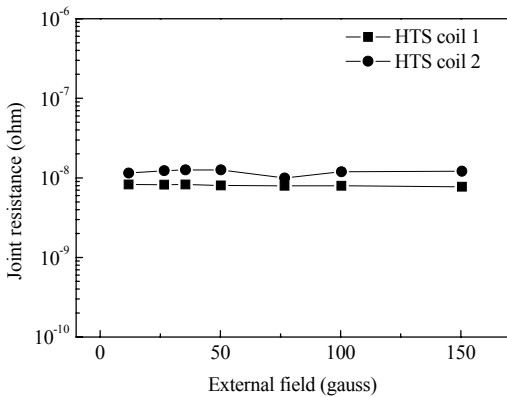
Fig. 8은 외부자계에 의해 발생된 유도 전류의 측정값과 계산값을 비교하여 도시하였다. 외부 자계만의 크기를  $B_e$ 라고, 외부 자계가 있는 상황에서 초전도 페루프가 중심부에 존재할 때 측정된 자계를  $B_m$ 이라고 했을 때 유도 전류에 의한 자장  $B_i$ 는  $B_i = B_e - B_m$ 의 관계를 갖는다. 즉, 유도 전류만에 의한 자장성분( $B_i$ )은 두 측정값의 차이로부터 알 수 있고 이는 차폐 전류만의 크기를 시사하는 것이다. Fig. 8의 (a)는 코일 1, (b)는 코일 2에서 계산된 유도전류 값

( $B_i$ )과 측정된 값(Fig. 7(a)의 결과)을 비교하였으며 계산값과 측정값이 유사함을 알 수 있다. 이러한 결과로부터 외부자계로 인한 유도전류는 초전도 페루프 코일의 임계전류 특성과 연관이 있는 것으로 사료된다. 그러나 기존에 보고된 Z. Han 논문에 의하면 유도자계는 페루프의 형상에만 의존하는 것으로 보고 되었으나, 실제 실험 결과 페루프의 형상과 임계전류 두 가지 변수 다 의존하는 것으로 보인다 [12].

Fig. 9는 접촉 길이를 달리하여 접합한 선재에서 각각 4 단자법과 자장감쇠법으로 측정된 접합저항을 나타내었다. 그림에서 보는바와 같이 4 단자법과 자장감쇠법으로 측정된 결과들은 접촉길이가 증가함에 접합저항값은 작아지나 두 방법에 의해 측정된 저항은 접촉길이가

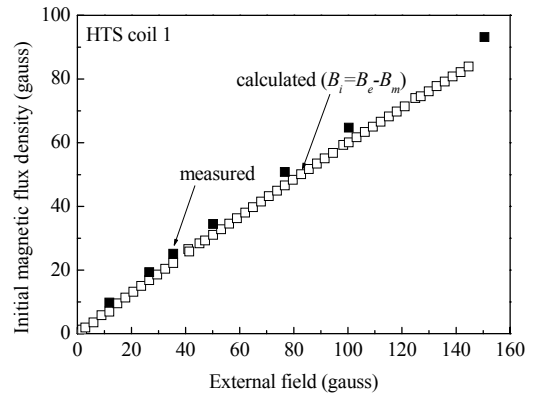


(a)

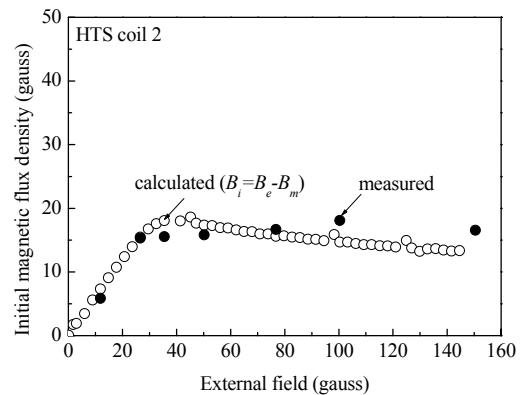


(b)

Fig. 7. Dependence of the (a) initial magnetic flux density and (b) joint resistance in closed loop on external field strength (ramping time : 0.1 A/sec).



(a)



(b)

Fig. 8. Dependence of the initial magnetic flux density in (a) coil 1 and (b) coil 2 on external field strength.



증가함에 따라 조금씩 차이를 보인다. 먼저, 4 단자법으로 측정한 결과는 접촉길이가 1, 3, 7 cm일 때 접합저항은 각각  $128.0 \times 10^{-9} \Omega$ ,  $54.2 \times 10^{-9} \Omega$ ,  $38.3 \times 10^{-9} \Omega$ 로 계산되었으며, 자장 감쇠법으로 측정한 결과는  $107.0 \times 10^{-9} \Omega$ ,  $22.9 \times 10^{-9} \Omega$ ,  $11.4 \times 10^{-9} \Omega$ 로 계산되었다. 이는 계측기 노이즈와 측정한계 때문에 사료되며  $10^{-7} \Omega$  이하의 저항 측정 시에는 측정방법에 따라 약간의 저항 차이를 보인다. 측정방법에 따른 이러한 차이는 마그네트 설계 및 제작 시 유용한 자료로 이용할 수 있을 것으로 사료된다. 실제로 응용되는 대규모의 마그네트 제작 시 접합저항은 자장감쇠법으로 평가하기 어려우며, 또한 초전도 접합방법으로 접합할 경우 저항값이 최소  $10^{-10} \Omega$  이하의 수준이므로 4 단자법으로 측정이 곤란하기 때문이다.

Fig. 10은 단척접합시료에서 4 단자법을 이용하여 측정한 접합저항과 접합부의 저항전지수(index n)를 나타낸 그래프이다. 접합저항은 접합시료의 V-I 곡선에서 옴의 법칙을 따라 선형적으로 증가하는 기울기로부터 계산하였으며 저항지수는 0.1~1사이의 전계범위에서 계산되었다. 그림에서 보는바와 같이 접촉길이가 증가함에 따라 접합저항값은 낮아지며, 반대로 저항전지수는 점차 증가한다. 접촉 길이가 7 cm 일 때 접합저항은  $38.3 \times 10^{-9} \Omega$ 이며 저항전지수는 5.7이다. 이 값은 고온초전도 선재를 영구전류모드로 운행하기 위해 필요한 수준 ( $R < 10^{-12} \Omega$ , index  $n \gg 7$ )에는 미치지 못하므로 영

구전류모드에 적용하기는 어려운 것으로 판단된다.

저항전지수는 초전도 선재의 임계전류밀도와 저항전지수에 따른 전기장으로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$E = E_c \left( \frac{J}{J_c} \right)^n \quad (5)$$

식 (5)에 의하면, 어떠한 초전도 선재의 경우에도 필연적으로 유한한 값( $n < \infty$ )의 저항전지수에서는 전기장이 0 이 될 수 없다. 즉, 5.7 정도의 저항전지수는 초전도 선재에 비록 임계전류보다 작은 전류가 흐를 때에도 완전한 초전도성을 갖지 못하며 저항전지수 손실을 가지게 된다. 결과적으로 접합부에서는 접합저항뿐만 아니라 낮은 저항전지수로 인한 손실까지 고려해야 되며, 고 효율의 영구전류모드가 운행되기 위해서는 낮은 접합저항과 우수한 저항전지수를 갖는 접합방법에 대해 연구가 필요하다.

#### IV. Conclusions

본 연구에서는 자장감쇠법과 4 단자법을 이용하여 초전도 선재의 접합저항을 평가하였으며 접합부의 구현은 임계 전류가 상이한 AMSC 사의 선재와 자체 제작한 19심 선재를

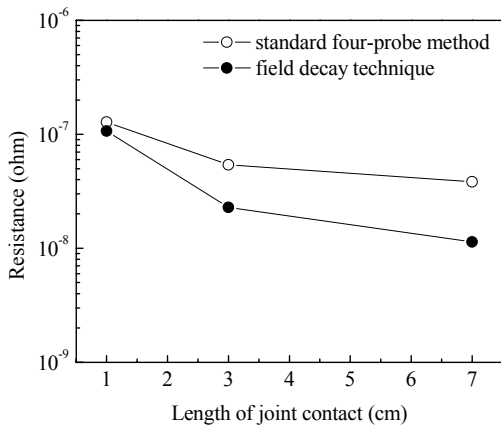


Fig. 9. Comparison of the resistance by the joint measurement techniques.

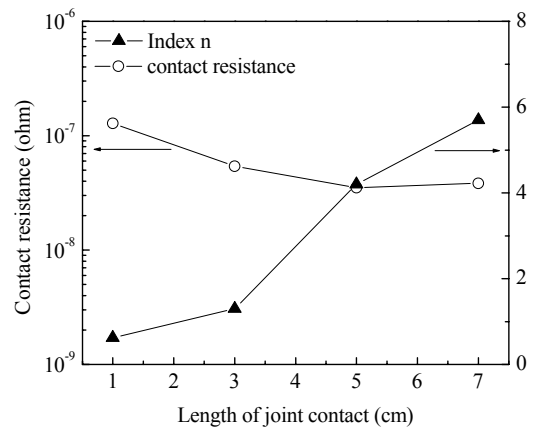


Fig. 10. Dependence of contact resistance and index n in jointed tape on the contact length.

이용하였다. 접합부는 상전도 접합방법을 이용하였으며, 40Pb/60Sn 솔더와 플럭스를 사용하였다. 두 종류의 선재로 제작된 페루프에서 스윙 시간과 외부자계크기변수에 의해 접합저항을 측정하였을 때  $8.0 \times 10^{-9} \Omega \sim 11.4 \times 10^{-9} \Omega$  로 큰 차이를 보이지 않았으며 이러한 결과는 접합저항이 삽입재료의 비저항에 의존하기 때문이다.

외부자계에 의해 페루프 코일에 유도되는 초기전류값은 각 코일의 형상, 임계전류, 접합저항과 연관이 있는 것으로 사료된다. 이러한 실험결과는 수치해석기법인 Runge-kutta법을 통해서 서로 비교해 보았으며 그 결과 유사함을 확인할 수 있었다. 4 단자법과 자장감쇠법으로 측정한 접합저항 결과 접촉길이가 증가함에 따라 접합저항값은 작아지는 경향을 보이며 두 측정법에 따른 저항값은 근소한 차이를 보인다.

## References

- [1] T. Kiyoshi, K. Inoue, M. Kosuge, H. Wada, and H. Maeda, "Current decay evaluation of closed HTS coil circuits", *IEEE Trans. on Appl. Super.*, 7, 2, 877-880 (1997).
- [2] T. Hase, Y. Murakami, S. Hayashi, Y. Kawate, T. Kiyoshi, H. Wada, S. Sairote, and R. Ogawa, "Development of Bi-2212 multifilamentary wire for NMR usage", *Physica C*, 335, 6-10 (2000).
- [3] T. Hase, K. Shibutani, S. Hayashi, M. Shimada, R. Ogawa, Y. Kawate, T. Kiyoshi and K. Inoue, "Operation of superconductively jointed Bi-2212 solenoidal coil in persistent current mode", *Cryogenic*, 37, 201-206 (1997).
- [4] M. J. Leupold and Y. Iwasa, "Superconducting joint between multifilamentary wires 1. joint-making and joint results", *Cryogenics*, 16, 215-216 (1976).
- [5] J. H. Kim, K. T. Kim, J. Joo, and W. Nah, "A study on joining method of Bi-Pb-Sr-Ca-Cu-O multifilamentary tape", *Physica C*, 372-376, 909-912 (2002).
- [6] 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.
- [7] R. Musenich, S. Farinon, C. Priano, P. Fabbriatore, "Evolution of the ohmic voltage drop in connections of superconductors under time-varying current", *Cryogenics*, 40, 45-52 (2000).
- [8] Y. Iwasa, "Superconducting joint between multifilamentary wires 2. joint evaluation technique", *Cryogenics*, 16, 217-219 (1976).
- [9] S. Nakamura, "Applied numerical methods in C", 대영사, 388 (1996).
- [10] 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. Super.*, 11, 1, 3002-3005 (2001).
- [11] L. Horng and C. H. Tai, "Critical persistent current for a loop formed by a Bi-2223 Ag-sheated superconducting tape", *IEEE Trans. on Appl. Super.*, 11, 1, 3006-3009 (2001).
- [12] Z. Han, P. Vase, Y. Q. Shen, and T. Freltoft, "Superconducting Bi<sub>2</sub>Sr<sub>2</sub>Ca<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>x</sub> closed-loop coils carrying persistent current at temperature 77 K", *IEEE Trans. on Appl. Super.*, 7, 2, 873-876 (1997).