

## Bi-2223/Ag 초전도시스템의 펜치특성을 위한 열적 파라미터 평가

최세용\*, 나원수\*, 장석현\*\*, 주진호\*\*, 하홍수\*\*\*, 손명환\*\*\*, 권영길\*\*\*

\*성균관대학교 정보통신공학부, \*\*성균관대학교 신소재공학과, \*\*\*한국전기연구원

### The evaluation of thermal parameter for quench characteristics in Bi-2223/Ag superconducting system

S. Choi\*, W. Nah\*, S.H. Jang\*\*, J. Joo\*\*, H.S. Ha\*\*\*, M.H. Sohn\*\*\*, Y.K. Kwon\*\*\*

\*ECE, Sungkyunkwan University, \*\*Sungkyunkwan University, \*\*\*KERI

**Abstract** - In this study, we estimate the thermal conductivity of stainless steel reinforced Bi-2223/Ag tape which was made from American Superconductor. The equipments for thermal conductivity measurement was set up using conduction cooled cryocooler. Two direction of thermal conductivity was measured. The one is the direction of transverse of cut length, and the other is direction of transverse of wounded coil with insulation material. It was observed that the thermal conductivity of transverse direction of coil was extremely lower than that of cut length direction. It was mainly seems that superconducting filaments and insulation material were effected on thermal conductivity in thermal conductivity of transverse direction.

### 1. 서 론

일반적으로 고온초전도선재 특히 Bi-2223/Ag 초전도선재 사스템의 저온초전도선재로 구성된 시스템에 비해 펜치문제에서 비교적 자유로운 설정이다. Bi-2223/Ag 초전도선재의 경우 100 K 이상의 임계온도 특성을 갖지만 실제 응용분야에서는 자계에 대한 임계전류저하 현상이나 보다 큰 임계전류 영역에서 사용하기 위해서 액체질소 온도인 77 K 이하에서 사용된다. 일반적으로 초전도모터의 경우 대략 20-30 K 대역에서 응용되며 초전도변압기나 한류기의 경우 고화질소방식을 사용하여 60 K 대역에서 사용된다. 더욱이 최근 제 2세대 YBCO 박막선재의 개발이 활발하게 이루어지면서 고온초전도선재에 대한 펜치 특성 평가의 필요성이 새롭게 대두되고 있다. 특히 YBCO 박막선재의 경우 박막 특성상 Bi-2223/Ag 초전도선재와는 달리 안정화 층(stabilizer layer)을 필요로 하며 과도상태 시 시스템을 보호하기 위한 노력이 필요하다 [1].

일반적으로 고온초전도선재의 경우 모재로 Ag 혹은 Ag 합금이 널리 이용되는데 가공성이 좋고 전기전도도도 좋아서 사고 시 펜치가 발생하였을 때 사고 전류를 분담할 수 있는 능력을 가질 수 있기 때문이다. 과도상태 시 초전도선재의 특성평가를 위해서는 비열이나 열전도와 같이 온도에 비선형적인 특성을 갖는 파라미터들을 기지하여야 효과적인 펜치 대책수립 및 정량적인 펜치특성의 분석이 가능하게 된다. 그러므로 본 연구에서는 20-30 K의 온도대역에서 동작하는 초전도모터에 사용되는 고임계전류 및 고강도 상용 Bi-2223/Ag 초전도선재의 펜치특성평가를 위한 열적 파라미터 중 열전도도를 평가하기 위한 측정장치를 구축하고 열전도도를 측정하는 연구를 수행하였다. 특히 대부분의 초전도선재의 경우 원선에 적용되는 점을 감안하여 초전도선재의 길이 방향 및 횡방향으로의 열전도도를 평가하였다. 측정대상으로는 100 마력급 초전도모터의 계자코일로 사용되는

American Superconductor 사의 고강도 선재(Stainless steel reinforced tape)를 사용하였다. 우선 선재의 길이 방향의 열전도도를 단척시료를 이용하여 평가하였으며 실제 계자코일의 일부분을 절단하여 구축된 측정장치에 적용이 가능하도록 시료를 가공하여 실제코일에서의 횡방향에서의 열전도도를 측정하였다.

### 2. 본 론

#### 2.1 열전도도 측정장치

그림 1에서는 초전도선재의 열전도도를 평가하기 위한 측정장치의 개략도를 도시하였다. 샘플을 냉각하기 위한 냉동장치로 CTI-350 cryocooler가 사용되었으며 최대 10 K 까지 cold head부를 냉각할 수 있다. 냉동기는 진공을 유지하기 위해 외부 진공조가 있으며 약 10<sup>-6</sup> torr의 진공도를 유지하도록 고안되었다. 안쪽에는 열적 교란을 막기 위한 thermal shield 층이 존재하며 thermal shield 내부에 2 stage의 cold head가 있다. 측정을 위한 샘플 홀더가 cold head부에 부착된다. 냉동기에는 19핀으로 구성된 feed-through가 연결되어 있으며 이 부분을 통해서 샘플에 열원의 인가나 샘플에 부착된 온도센서 등의 신호를 외부 계측시스템으로 전달하게 된다. Temperature controller에서 열전도도 측정 시료에 부착된 히터로 열원을 입력하여 시료상에 열 구배를 발생시키게 되며 Lakeshore사의 Temperature controller 330 모델을 사용하였다.

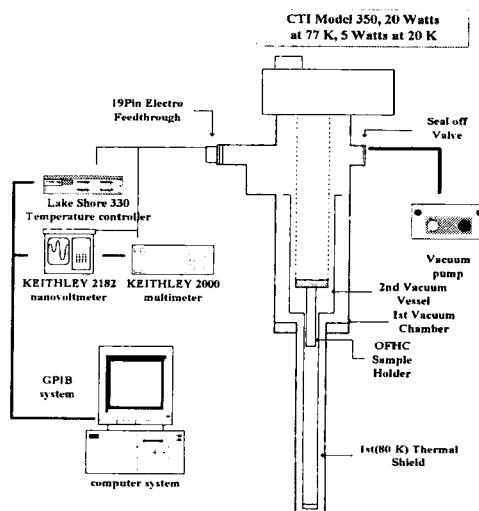


그림 1. 열전도도 측정장치 개략도

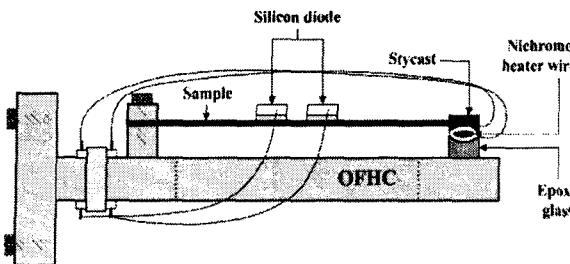


그림 2. 열전도도 측정용 샘플 홀더 개략도

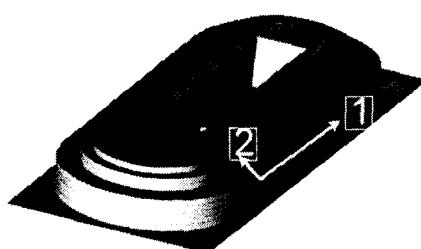


그림 3. 열전도도 측정 방향에 대한 개념도

Temperature controller에 의해서 발생된 온도구배는 열전도도 측정을 위한 기본 데이터가 되며 이때 입력된 열량은 Temperature controller에 각각 직렬 그리고 병렬로 연결되어 열에너지를 측정하게 되며 이를 위해 Keithley 2182 Nanovoltmeter와 Keithley 2182 Multimeter가 각각 부착되었다 [2].

그림 2에는 샘플홀더의 개략도를 도시하였다. 그림 2의 샘플홀더는 그림 1에서 도시한 CTI-350 냉동기에 부착하여 샘플을 냉각시키게 된다. 샘플홀더는 열전도가 우수한 재료인 무산소동(OFHC)을 이용하여 가공되었으며 산화를 방지하기 위해서 표면이 금도금 처리되었다. 그림에서 보는 바와 같이 시료는 볼트를 이용하여 접촉방식으로 샘플홀더에 고정되어 냉각된다. 시료위에는 일정한 간격으로 온도센서를 부착하여 샘플의 온도구배를 측정하게 되며 본 연구에서는  $\pm 0.05$  K의 오차범위를 갖는 Lakeshore사의 CU-type 온도센서를 사용하였다. 온도센서들은 Ge7301 바니쉬를 이용하여 시료에 부착되었다. 냉동기에 부착된 시료의 반대쪽에는 샘플에 열원을 입력하기 위한 장치가 부착된다. 열원은 Lakeshore사의 NiCr 히터 와이어 NC-32를 이용하여 열을 전달하며 제조사에서 제공된 자료에 의하면 NiCr 히터 와이어는 단위 cm당 0.33 W(@4.2-77 K)의 저항을 발생시킨다. 본 연구에서는 약 76 cm의 길이를 환형으로 권선하여 stycast로 핵침하였으며 이때 약 25 Ω의 저항을 발생시킨다.

## 2.2 열전도도 측정방법

일반적으로 열전도도의 측정은 전도냉각을 이용한 직접측정방식과 밀도, 비열, 열확산도를 이용하여 평가하는 간접측정방식이 있다. 본 연구에서는 상대적으로 정밀도가 우수한 thermal integral 법을 사용한 직접 측정방식을 채택하였다. 이 측정법은 냉동기 또는 극 저온조안에서 냉각된 샘플홀더에 샘플을 부착시키고 히터나 기타 열원을 입력하여 샘플의 온도구배를 발생시켜 이러한 차이로부터 열전도도를 측정하는 방식이다. 그림 1과 그림 2와 같이 구축된 측정 장치들을 이용해 열전도도를 측정하게 되며 간략한 측정방법은 다음과 같다 [2].

우선 그림 2에 도시한 열전도도 측정용 샘플홀더에 시

편을 연결하고 냉동장치의 thermal shield와 vacuum shield를 연결한다. mechanical pump를 이용해서 샘플홀더의 공간이  $5 \times 10^{-2}$  torr가 되도록 진공상태를 만들며 이후 냉동기가 동작하면서  $10^{-8}$  torr의 진공도를 유지하도록 하였다. 진공도가 안정적으로 된 후 냉동기를 동작시켜 시료 및 cold head 온도가 10 K가 되도록 냉동시킨다. 시료의 온도가 냉동기의 한계온도까지 충분히 냉각되었을 때 Temperature controller를 동작시켜 시료의 단부에 부착된 히터에 열량을 입력하여 시료의 온도를 조정한다. 이때 발생된 온도구배는 약 2-4 K 이내가 되도록 조절하였으며 온도구배는 온도편차가 없는 정상상태가 되도록 하여 일정한 온도차가 약 100초 이상을 유지하도록 한 후 측정을 시작하였다. 이때 히터에 인가된 열량은 전술한 바와 같이 Nanovoltmeter와 Multimeter에 기록된 전압 및 전류로부터 수회 측정하여 그 평균값으로 기록 되었다. 이러한 측정결과 각 온도대역에서 측정된 온도구배가 각각  $T_0$ 과  $T_1$  (K)이라고 하고 시편에 가해준 열량을  $Q$  (W), 시료의 단면적을  $S$  ( $m^2$ ), 시편의 길이를  $L$  (m), 그리고 사료의 열전도도를  $k$  ( $W/m \cdot K$ )이라고 가정하면 다음 수식 (1)에 의해서 열전도도가 평가된다.

$$Q = \frac{A}{L} \int_{T_0}^{T_1} k(T) dT \quad (1)$$

## 2.3 열전도도 측정 시료

본 연구에서는 100마력급 초전도모터의 계자코일로 사용되는 Bi-2223/Ag 초전도선재의 열전도도를 평가하고 한다. 계자코일의 권선용으로 사용되는 초전도선재는 American Superconductor사의 Stainless Steel reinforced Bi-2223/Ag 초전도선재로 고 임계전류 특성 및 권선 시 굽힘 변형에 강하도록 설계 제작된 초전도 선재이다. 본 연구의 열전도도 평가에 사용된 초전도선재의 자세한 사양을 표 1에 도시하였다. 또한 본 연구에서는 초전도선재의 길이방향 그리고 초전도모터 계자코일용 권선의 횡방향에 대한 열전도도를 평가하였다. 이러한 측정방향에 대한 개념도를 그림 3에 도시하였다. 그림 3에서 도시한 1번은 일반적인 선재의 길이방향의 열전도도 평가를 의미한다. 또한 2번의 방향은 초전도코일의 횡방향 열전도도의 평가를 의미한다. 3번방향의 열전도도 평가를 위해서 실제 초전도모터 계자코일에 사용되는 권선 중 일부를 절단하여 측정하였다. 권선된 계자코일은 더블팬케익 형태로 권선되었으며 이때 상단부가 약 70 회 권선되었으며 하단부가 104회 권선되었으며 각각 단면의 적층된 두께는 25와 40 mm이다. 측정에 적합하도록 권선부는 일정한 두께로 다이아몬드 휠 커터를 이용하여 표면이 매끄럽게 되도록 절단되었다. 3번방향의 열전도도는 각 권선마다 삽입된 절연지 및 기타 절연물질들로 인해서 1번 방향의 열전도도에 비해 특성이 나쁠 것으로 예상되었다. 하지만 수백 혹은 그에 상회하는 권선이 이루어질 경우 길이방향 뿐만 아니라 횡방향 열전도도 특성도 웬치 및 저온 설계에 유효하게 사용될 수 있을 것이다.

표 1. SUS-reinforced Bi-2223/Ag  
초전도선재의 사양

size (mm)	4.1 × 0.21
filamentary region (mm)	3.9 × 0.15
number of filaments	55
critical current (A)	120-130
index n	20

### 3. 결과 및 토의

그림 4에서는 그림 3에서 정의한대로 1번 방향의 열전도도를 평가하여 도시하였다. 열전도도의 평가범위는 약 10-100 K 사이에서 수차례 측정한 결과를 평균으로 하여 도시하였다. 본 연구의 목적은 AMSC사의 SUS reinforced Bi-2223/Ag 초전도선재의 열전도도 평가가 목적이지만 측정결과를 비교하기 위해서 다른 매질들의 평과결과와 비교하여 도시하였다. 비교된 결과들은 AMSC사의 non-reinforced Bi-2223/Ag 선재, Ag 모재로 제작된 Bi-2223/Ag 선재, 그리고 순수한 Ag 플레이트를 함께 측정하여 비교하였다. AMSC사의 초전도선재는 모재가 Ag 합금으로 이루어져 있어 순수한 Ag plate나 Ag 모재 초전도 선재에 비해 열전도도 특성이 다소 취약한 것으로 조사하였다. 특히 본 연구의 평가 대상인 SUS reinforced 초전도 선재의 경우 선재의 양쪽 면에 덧붙여진 Stainless로 인해서 열전도도 특성이 가장 안 좋은 것으로 관찰되었다. 전체 온도영역에 대해서 비교하였을 때 SUS reinforced 선재의 경우 순수 Ag 모재 초전도 선재에 비해 약 3-10 배까지 낮은 열전도도 특성을 보였다.

그림 5에서는 그림 3에서 도시한 실제 초전도코일의 1번 방향 즉 권선부 횡방향으로의 열전도도 평가결과를 도시한 것이다. 그림 4에서 도시한 평가결과의 경우 단척시료에 의한 측정은 온도구배 발생이나 안정화가 비교적 쉬운 편이었으나 코일의 권선부의 일부를 절단하여 측정한 경우 수십 개의 초전도 선재가 적층된 형태이며 더욱이 각 선재 간에는 절연물질이 삽입되어 있어 열전도도 평가에 다소 많은 시간이 소요되었다.

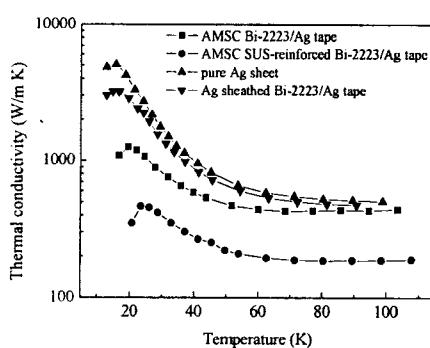


그림 4. 길이방향의 열전도도 평가

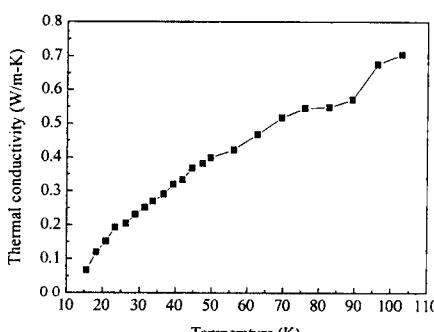


그림 5. 초전도코일 권선부의 횡방향 열전도도 평가

초전도선재의 모재의 열전도도에 비해 초전도 코아 부분은 온도별로 수백에서 수천 배 낮은 열전도도를 갖게 된다. 그러므로 횡방향으로의 열전도도는 모재사이에 있는 초전도 코아 부분이 열전도도 특성에 유효하게 작용하게 되며 또한 각 초전도선재와 선재간의 절연재 역시 열전도도 특성을 좌우하는 중요한 요소로 작용하게 된다. 그림 5에서 도시한 바와 같이 코일 권선부의 횡방향 열전도도 특성은 그림 4의 길이방향의 특성에 비해 무시할 정도로 낮은 특성을 보이고 있다. 초전도모터의 유효 동작온도가 약 20-40 K 사이로 가정할 때 횡방향의 열전도도는 수천 배의 차이를 보이는 것으로 조사되었다. 그러나 횡방향의 절대적인 열전도도 특성은 매우 미미한 특성을 보이지만 초전도코일의 권선 특성상 수백 미터 혹은 수 킬로미터의 권선이 가능하다는 점을 감안할 때, 저온 설계 혹은 퀸치특성평가를 위해서는 반드시 획득되어야 할 결과로 판단된다.

### 3. 결 론

본 연구에서는 AMSC사의 SUS reinforced Bi-2223/Ag 초전도선재의 열전도도를 평가하였다. 열전도도 평가를 위해 측정 장치가 구축되었으며 이를 이용하여 초전도선재의 길이방향의 열전도도와 초전도코일 권선부의 횡방향 열전도도를 측정하였다. 횡방향 열전도도의 경우 초전도 필라멘트들로 구성된 코아 및 절연재 삽입 등의 이유로 그 특성이 매우 작은 값을 나타냈지만 저온부 설계 및 퀸치특성평가를 위해서 유효한 결과로 사용될 수 있을 것으로 사료된다.

### 감사의 글

본 연구는 21세기 프런티어 연구개발사업인 차세대 초전도용 기술개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

### [참 고 문 헌]

- [1] Chun-li Wu, Zhi-ming Bai, Jing-hui Li, Jin-xing Wang, "Normal-zone propagation velocities in Bi-2223/Ag superconducting multifilament tape", Physica C 386, pp.166-169, 2003.
- [2] Seok Il-Hee Jang, Jun Hyung Lim, Jung Ho Kim, Bong Ki Ji, Jinho Joo, Wansoo Nah, John Slavko Wolf, Hua Kun Liu, and Miles Apperley, "Characterization of thermal conductivity and mechanical properties of Ag-alloy sheathed Bi(Pb)-Sr-Ca-Cu-O superconductor tape", IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY, VOL. 13, NO. 2, pp. 2956-2959, June 2003.