

## Stability of Ag Sheathed Bi-2223 HTS Tape

### 은 피복 Bi-2223 고온초전도 선재의 안정성

Hyun-Man Jang\*, Sang-Soo Oh, Hong-Soo Ha, Dong-Woo Ha,  
Jong-Man Jeong, Kang-Sik Ryu and Sang-Hyun Kim\*

장현만\*, 오상수, 하홍수, 하동우, 정종만, 류강식, 김상현\*

P.O. Box 20, Changwon, Korea 305-600, Applied Superconductivity Laboratory,  
Korea Electrotechnology Research Institute  
\*Gyeong Sang National Univrtsity, Dept. of Electrical engineering

창원우체국 사서함 20, 한국전기연구소 초전도응용연구사업팀  
\*경상대학교 전기공학과

Using Ag sheathed multi filamentary Bi-2223 tape, stability against heat pulse has been investigated. The measured normal zone propagation(NZP) velocity of the tape was found to be faster due to increase of operating current and magnetic field, and agree well with calculated data from one dimensional heat balance equation. Minimum quench energy(MQE) was found to be larger than 17 J at 30 K zero magnetic filed at operating current of 96.5 with respect to  $I_c$ .

### 1. 서론

Bi계 고온초전도 선재를 이용하여 마그네트를 제작하고 마그네트의 보호회로의 설계를 위해서는 고온초전도체에 대한 안정성에 대한 정량적인 평가가 요구된다[1].

일반적으로 Bi계 고온초전도체는 임계온도가 높고 비열이 크기 때문에 안정성 마진이 크다. 그러나 고온초전도 마그네트의 운전 중에 국부적인 발열로 인하여 퀘치가 일어나게 되면 상전도 영역(Normal Zone)이 빠르게 코일 전체로 분산되지 못하고 발열부분이 집중적으로 가열되어 코일 전체의 손상이 우려될 수 있다[2]. 이러한 관점에서 최근에 Bi-2223 고온초전도 선재를 이용한 소형 팬케이크 코일의 퀘치 특성에 대해서 연구하고 발표한 바 있다[3].

본 연구에서는 이전의 연구 결과를 바탕으로 은 피복 Bi-2223 테이프를 제조하여 히트펄스에 의한 상전도 영역 전파속도를 측정하였으며, 상전도 영역 전파속도와 외부 자장과의 관계에 대해서도 조사하

였다. 그리고 1차원적 열 평형 방정식을 이용해 고온초전도 테이프의 퀘치 특성을 수치적으로 해석하여 실험에서 측정된 결과와 비교하였다.

### 2. 선재 제조 및 실험

PIT법으로 은 피복 Bi-2223 고온초전도테이프를 제조하였다. 먼저 하소된 BSCCO분말을 외경 10  $\phi$  내경 8  $\phi$ 인 순은 튜브에 진동충진하고 500  $^{\circ}$ C 진공상태에서 수 시간동안 예비 열처리를 한 후 1.56  $\phi$ 까지 가공하고, 가공된 단심 선재를 다시 외경 10  $\phi$  내경 8  $\phi$ 인 튜브에 19 가닥을 적층하여 삽입한 후 인발 및 압연공정을 거쳐 0.22 mm  $\times$  3.8 mm 크기의 테이프형태로 제조하였다. 제조된 테이프는 35 mm  $\phi$  알루미늄 튜브에 감아서 840 $^{\circ}$ C에서 열처리하고, 열처리가 끝난 테이프는 샘플홀더에 고정시켰다.

제조된 선재에 히트펄스를 가하기 위해 극저온용 히터 선을 압연해서 가열 면적이 20 mm  $\times$  3 mm가 되게 하여 초전도 테이프에 부착시켰다.

히터에서 발생한 열이 외부로 발산되는 것을 방지하기 위하여 열전도도가 낮은 저온 에폭시를 히터에 발라서 단열 시키고, 다시 Kapton 테이프와 진공 그리스로 단열 시켰다.

히트펄스 이후의 상전도 영역의 전과속도를 측정하기 위해 히터로부터 1 cm간격으로 5개의 전압단자를 설치하였으며 발열지점에 Chormal - CuFe 열전대를 부착하여 테이프의 온도변화를 관측하고자 하였다. 샘플의 온도는 cernox 온도 센서로 측정하였다.

제작된 샘플의 냉각을 위해 온도 가변 insert dewar를 사용하였으며, 그림 2에 insert dewar의 개략도를 나타내고 있다. Insert dewar는 액체헬륨 용기에 삽입하여 사용한다. 4.2 K 액체헬륨을 insert dewar의 니들 밸브와 연결되어 있는 LHe 도입부를 통해 내부로 흘려보내어 코일을 냉각한다. 이때 액체는 LHe 도입부를 통과하면서 가스 상태가 되고, 유입되는 헬륨 가스는 열 교환기를 통과하게 된다. 열 교환기에 부착된 온도센서(cernox)와 히터를 연동시켜 4.2 K~77 K 까지 온도를 제어하여 실험하였다. 측정 시 insert dewar 내부의 온도 편차는 설정온도  $\pm 0.3$  K였다.

표 1. Bi-2223 고온초전도테이프의 사양

Table 1. Specifications of the Bi-2223 HTS tape

Tape Thickness	0.22 mm
Tape Width	3.8 mm
Tape Length	50 cm
Ag/SC Ratio	2.3
Resistance of heater	2.8 $\Omega$

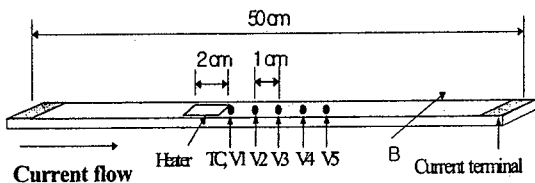


그림 1. 전압단자와 히터 등의 위치를 나타내기 위한 샘플의 개략도

Fig. 1. Schematic view of sample tape and locations of voltage taps and heater

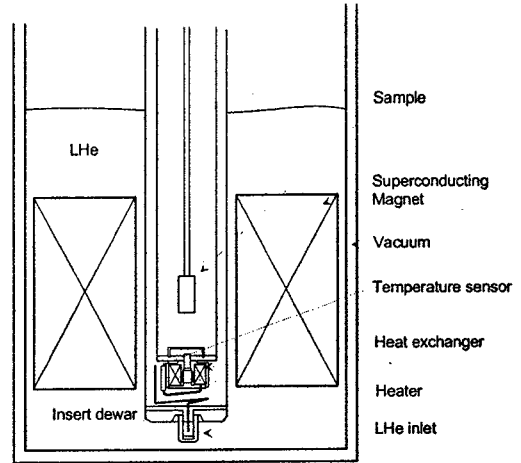


그림 2. 온도가변 insert dewar의 개략도

Fig. 2. Schematic drawing of temperature variable insert dewar

### 3. 실험결과 및 고찰

제조된 테이프의 안정성 실험을 위한 동작전류를 결정하기 위해 20 K에서 77 K까지 온도를 변화시키면서 임계전류를 측정하여 그림 3에 나타내었다. 외부자장은 1 T까지 인가하였으며 테이프표면과 평행하게 가하였다. 임계전류는 전압단자 양단에서 기준전계  $1 \mu\text{V}/\text{cm}$ 에 해당되는 전압이 발생할 때의 전류 값으로 결정하였다. 30 K, 0 T일 때와 1 T일 때 임계전류는 각각 51.8 A와 29.4였는데 77 K, 0 T 때 임계전류보다 4.4배와 2.5배씩 증가하였다.

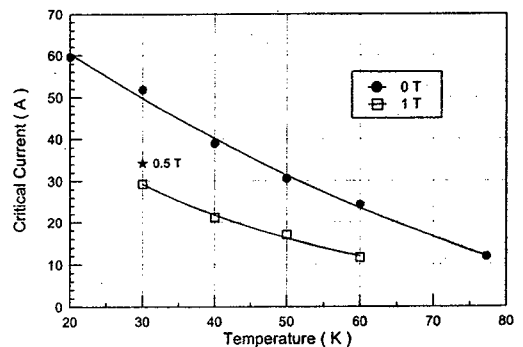


그림 3. 임계전류의 온도 의존성

Fig. 3. Temperature dependance of critical current

그림 3에 나타난 결과를 바탕으로 고온초전도 테이프에 임계전류의 50~90 %에 해당되는 전류를 인가하고 히트펄스를 가한 후 코일의 온도변화와 동작전류에 대한 상전도 영역 전파속도를 측정하고자 하였다.

그림 4와 그림 5는 30 K, 0 T와 1 T일 때 임계전류의 약 90 %에 해당되는 전류를 인가하고 히터에 6.7 A, 100 ms 펄스전류를 인가한 후 발생하는 전압을 측정한 결과이다. 그림에 나타난 두 가지 경우 모두 히트펄스 이후에 전체적으로 퀸치가 일어나지 않고 다시 회복되는 경향을 나타내고 있다. 이러한 이유로는 히터에서 발생된 열이 고온초전도 테이프에 완전히 전달되지 못했기 때문에 고온초전도 테이프에 가해지는 열이 퀸치를 일으킬 수 있을 만큼 크지 않고, 은의 고유저항이(30 K ;  $0.12 \cdot \mu\Omega \cdot \text{cm}$ )[4] 매우 작기 때문에 초기 동작전류가 모두 안정화체인 은을 통하여 흐른다 하더라도 발생하는 주열 에너지는 1 cm 당 46 mJ 정도로서 테이프의 온도변화에는 큰 영향을 주지 못하기 때문으로 사료된다.

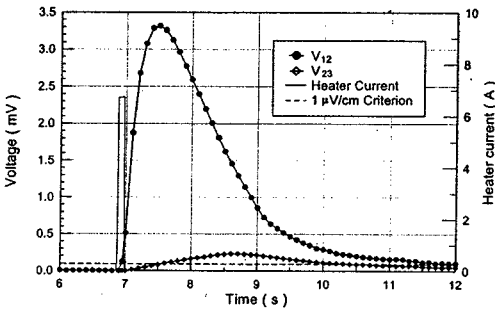


그림 4. 히트펄스 이후 전압변화  
(30 K, 0 T,  $I_{op}$  : 48 A ; 90 % of  $I_c$ )

Fig. 4. Voltage traces after heat pulse

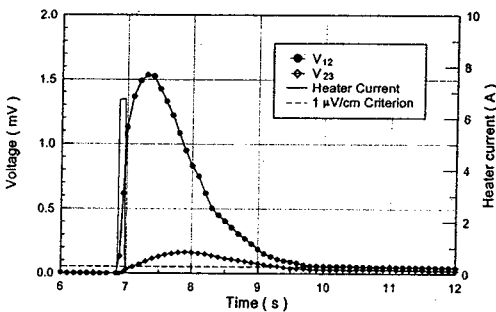


그림 5. 히트펄스 이후 전압변화  
(30 K, 1 T,  $I_{op}$  : 26 A ; 90 % of  $I_c$ )

Fig. 5. Voltage traces after heat pulse

그림 4와 그림 5의  $V_{12}$ 는 초기 히트펄스에 의한 영향으로 다소 급격하게 전압이 증가하다가 서서히 회복되는 경향을 나타내고 있다. 그리고  $V_{23}$ 에도 서서히 전압이 나타나는데, 이것으로 히트펄스로 인해 고온초전도 테이프의 발열지점에 국부적으로 상전도 영역이 형성되고 길이방향으로 서서히 전파됨을 알 수 있다.  $V_{23}$ 에서 임계전류의 기준전계에 해당되는 전압이 발생할 때 까지의 시간을 전압단간 거리로 나누어서 상전도 영역의 전파속도를 구할 수 있는데 그림 4(0T) 보다 그림 5(1T)의 증가 추세가 빠른 것을 관찰 할 수 있었다. 이것으로 초전도 테이프에 자장이 가해질수록 상전도 영역의 전파속도가 빨라짐을 알 수 있는데, 초전도 테이프에 자장이 가해질수록 은의 저항이 증가하고 자장하에서의 임계온도와 안정화재로 전류가 분류되는 온도가 낮아지기 때문으로 사료된다.

이와 같이 히트펄스로 인해 변화되는 테이프의 특성을 조사하기 위해서 고온초전도 테이프를 1차원 적으로 모델링하여 수치적으로 해석하고자 하였다. 고온초전도 테이프의 1차원적 열 평형 방정식은 식 (1)과 같이 표현되며 다음과 같은 가정이 요구된다. 첫째 : 고온초전도 코일의 상전도 영역 전파속도는 초전도테이프의 층간 및 길이방향의 열전도에 의해서 결정된다. 둘째 : 안정화재의 열전도율이 매우 높기 때문에 테이프 단면의 온도 분포는 균일하다

$$\gamma C \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} (K \frac{\partial T}{\partial x}) + Q_d + Q_j \quad (1)$$

여기서  $T$ 는 온도,  $x$ 는 길이방향의 좌표이며,  $t$ 는 시간을 나타낸다.  $\gamma C$ ,  $Q_d$ ,  $Q_j$ 는 각각 테이프의 평균 열용량, 교란열, 주열열을 나타내는데,  $Q_d$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q_d = \begin{cases} \frac{E_d}{2\sqrt{\pi}X_d T_d} \exp(-(\frac{x}{X_d})^2) & (t < t_d, x < X_d) \\ 0 & (t > t_d, x > X_d) \end{cases} \quad (2)$$

여기서  $X_d$ 와  $t_d$ 는 교란이 가해지는 길이와 교란 지속시간을 나타내고,  $E_d$ 는 교란에너지를 나타낸다. 그리고 테이프 단면의 온도가 균일하다고 가정 할 때  $Q_j$ 는 식 (3)와 같이 표현된다.

$$Q_j = \begin{cases} \rho(T) \frac{A_m}{A} J_a^2 & (T > T_c) \\ \rho(T) \frac{A}{A_m} (1 - \frac{J_{sc} A_{sc}}{J_a A}) J_a^2 & (T_{sh} < T \leq T_c) \\ 0 & (T \leq T_{sh}) \end{cases} \quad (3)$$

여기서  $A_m$ ,  $A_{sc}$  그리고  $A$ 는 각각 안정화재의 단면적, 초전도체의 단면적, 그리고 테이프 전체의 단면적을 나타내며,  $J_{sc}$ 와  $J_a$ 는 초전도체의 전류밀도와 테이프의 평균 전류밀도를 나타낸다.

그리고  $T_{sh}$ 는  $T_c - (T_c - T_{op}) \frac{I_{op}}{I_c}$  로 결정되며,

$\rho$ 는 Ag의 고유저항을 말한다. 계산에 사용된 각각의 물리량은 문헌[1],[4],[5]에서 인용하였다.

앞에서 나타낸 수식들을 조합하여 30 K에서 상전도 영역의 전파속도를 계산하여 실험 결과와 비교하여 그림 6에 나타내었다. 고온초전도 테이프에 임계전류의 약 90 %로 운전할 경우 상전도 영역의 전파속도는 외부자장이 없을 때 1.72 cm/s였으며, 1 T때는 2.1 cm/s로 계산되었다. 이 수치들은 실험에서 얻어진 결과와 비교적 유사하게 나타났다. 외부자장을 1 T로 유지하고 30 K와 40 K때 측정된 결과에서는 큰 차이를 관측할 수 없었다.

그림 7은 고온초전도 테이프를 30 K, 0 T때 50 A로 동작시키고 17 J과 18 J의 교란에너지를 가했을 때 발열지점의 온도변화를 계산한 결과이다. 17 J의 교란에너지를 가했을 때 발열지점의 온도는 히트펄스로 인해 초기에 220 K까지 온도가 상승했다가 5초 후에는 100 K 부근까지 냉각되었으며 계속적으로 냉각되는 경향을 나타내고 있다. 18 J을 입력했을 때는 히트펄스 이후 약 3초 이후부터는 다시 온도가 상승하여 서서히 퀘치가 일어남을 알 수 있는데, 이것으로 본 연구에서 제조된 고온초전도 테이프의 최소 퀘치에너지(Minimum Quench Energy; MQE) 17J보다 크며 18J보다 낮을 것으로 사료된다.

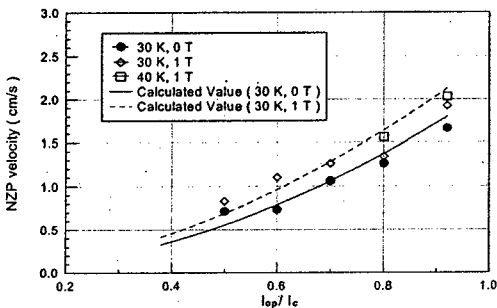


그림 6. 동작전류에 대한 상전도 영역 전파속도  
Fig. 6. NZP velocity vs operating current

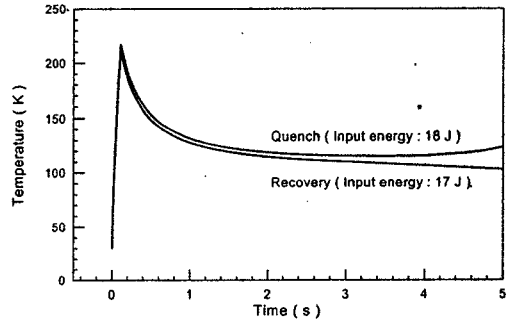


그림 7. 히트펄스 이후 발열 지점 온도  
Fig. 7. Hot-spot temperature after heat pulse

#### 4. 결론

본 연구에서는 PIT법으로 은시스 Bi-2223 테이프를 제조하여 히트펄스에 의한 상전도 영역전파속도를 측정하였으며, 1차원적 열 평형 방정식을 이용하여 테이프의 퀘치거동을 조사하였다.

30 K, 0 T에서 임계전류의 약 90 %동작시킬 때 상전도 영역 전파속도는 1.72 cm/s였으며, 1 T때는 2.1 cm/s였다. 상전도 영역 전파속도는 동작전류가 증가하고 외부자장의 세기가 증가할수록 빨라짐을 알 수 있었다.

본 연구에서 제조된 테이프의 MQE는 30 K, 0 T,  $I_{op}$  : 96.5 % of  $I_c$  동작조건에서 17 J < MQE < 18 J로 예측 할 수 있었다.

#### 참고문헌

- [1]Y.Iwasa,"Case Studies in Superconducting Magnets", Plenum Press 1994.
- [2]J.W.Lue et. al. "Quenches in a high-temperature superconducting tape and pancake coil", Cryogenics, Vol.36, pp.379-389, 1996
- [3]장현만 외, "은비가 다른 Bi-2223 팬케이크 코일의 퀘치 특성", 99년도 한국초전도·저온공학회 학술대회 논문집, pp.109-112, 1999
- [4]H.Fujishiro et. al. "Thermal and electrical properties of Ag-Au and Ag-Cu alloy tapes for metal stabilizers of oxide superconductors", Cryogenics, Vol.33, No.11, pp.1086-1090, 1993.
- [5]H.E.Fischer et. al. "Specific heat thermal conductivity and electrical resistivity of high temperature superconductors", Report, Lab. of Atomic and Solid State Physics, Cornell Univ., USA, 1989.