

크랙에 의한 Bi-2223/Ag 테이프의 임계전류 변화

박을주, 설승윤
전남대학교 자동차공학부

The change of critical current with crack formation in a Bi-2223/Ag tape

E. J. Park, S. Y. Seol
School of Automotive Engineering, Chonnam National University

syseol@chonnam.ac.kr

Abstract - The change of critical current with a crack formation in a Bi-2223/Ag tape was studied by experimental and numerical analyses. Critical current of Bi-2223/Ag tape was measured with a continuous DC-power supply. The current-voltage relation of a Bi-2223/Ag tape is measured by the four point method. Numerical method is used to solve two dimensional heat conduction equation. By comparing the experimental and numerical results, the validity of numerical method is verified.

1. 서 론

고온 초전도체는 취성의 세라믹이기 때문에 고온 초전도체 와이어나 테이프에 크랙이 종종 발생한다. 크랙은 내부의 열 발생이나 기계적 결합에 의해 발생하게 된다. 이러한 크랙은 사용빈도에 따라 점점 발전하게 되고 종국에는 초전도체의 파단에 이르고, 크랙의 발전과 동시에 초전도체의 특성저하를 가져온다.

초전도 테이프에서의 크랙의 영향에 대한 기존의 연구는 초전도체에서 발생하는 크랙만을 대상으로 실험과 수치해석이 이루어졌다[1]. 본 논문에서는 초전도체와 안정화재료가 동시에 크랙이 발생한 상태에 대한 고온 초전도체 테이프의 임계전류변화에 대한 실험적 연구를 하였다. 또한 유한차분법에 의한 수치해석에서는 온도분포를 해석하고 전류분류 모델을 적용하여 크랙 발생에 의한 임계전류 저하를 예측하였다.

2. 실험

2.1 시편제작

실험에서 사용한 시편은 그림 1(a)와 같이 Bi-2223/Ag 테이프를 폭방향으로 $W/2$ 만큼 인위적으로 크랙을 주고, (b)와 같이 베크라이트판

을 지지대로 사용하여 양단에 볼트와 너트를 이용하여 고정하였다. 여기서 L 은 고온초전도체 테이프의 길이이고 W 는 폭, t 는 두께이다. 전류리드는 구리판상으로 제작을 하였으며 전압차를 측정하기 위하여 10cm거리로 전압탭을 설치하여 나노-볼트 미터로 측정하였다.

Bi-2223/Ag 테이프의 안정화 재료인 은(Ag)과 초전도체 사이의 열팽창계수가 다르므로 시편 제작 과정에서 많은 열을 주었을 때 Bi-2223/Ag 테이프의 휨 현상이 발생한다. 이러한 휨 현상이 심하여 Bi-2223/Ag 테이프의 허용 곡률 반경을 초과하게 되면 테이프의 내부적인 결함, 즉 초전도체 필라멘트가 단락 되어버리는 현상을 초래 할 수 있으므로 최소한의 열응력을 가하여 제작하였다.

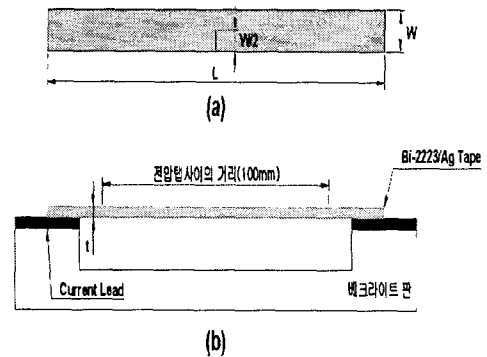


Fig. 134. Schematic diagram of experiment

2.2 실험방법 및 결과

본 연구의 실험들은 온도가 77K인 액체질소(LN₂) 속에서 수행되었다. 실험샘플은 액체질소에 넣기 전에 충분히 냉각을 시켜주고 난 후 액체질소 속에 넣었다. 그리고 직류 전원공급장치에서 전류를 천천히 증가시켜가면서 실험을 수행하였다. Bi-2223/Ag 테이프의 임계전류는 4-point 방법으로 $1\mu V/cm$ 의 기준에 의하여 측정하였다[2]. Bi-2223/Ag 테이프의 전압측정은 전류를 증가시킨 후 충분히 안정상태에 도달했을

때 측정하였다. 실험을 통하여 측정된 전류-전압 곡선은 그림 2에 나타내었다. 실험을 통해 크랙을 주지 않은 상태에서는 Bi-2223/Ag 테이프의 임계전류는 29.5A이다. 그러나 그림 2에서 보듯이 크랙을 Bi-2223/Ag 테이프의 전체 폭(W)에서 W/2만큼 주었을 때 임계전류는 14.25A이다.

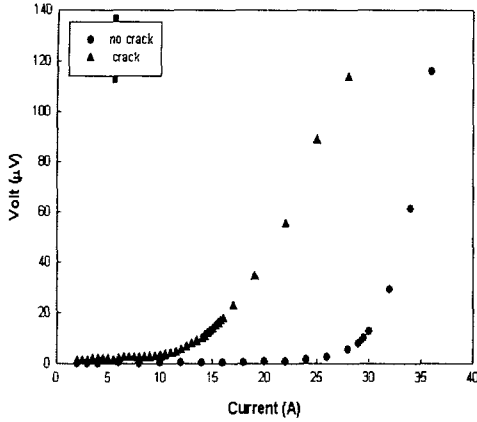


Fig. 135. Experimental results of V-I characteristic relation

3. 수치해석

3.1 전류분류 모델

온도(T)에 대한 임계전류밀도(J_c)의 관계는 그림 3과 같이 선형적으로 가정하였다[4]. J_{c0} 는 냉각제인 액체질소(LN₂)에서의 임계전류밀도이다. T_{cs} 는 작동전류밀도 $J_o(=I/A_s, A_s$ =초전도체의 단면적)에서 전류분류가 일어나기 시작하는 온도이고, T_c 는 임계전류밀도가 제로가 되는 지점에서의 임계온도이다.

Bi-2223/Ag 테이프의 단면 온도분포를 고려하여 발생하는 줄 열을 구하기 위하여 다음 식(1)과 같이 전류비 Ψ 를 정의한다.

$$\phi = \frac{I_c}{I} = \frac{1}{I} \int_{A_i} J_c(T) dA \quad (176)$$

Ψ 는 초전도체가 수용할 수 있는 최대전류와 실제 흐르는 전류의 비이다. 즉 Bi-2223/Ag 테이프에서 전류비가 1 이상이면 그 단면에서는 모든 전류가 초전도체로만 흘러 줄 열 발생이 없다. 그러나 전류비가 1 이하이면 전류분류상태가 발생하여 줄 열이 발생하고, 초전도체 부분은 그림 3과 같은 온도에 따른 임계전류밀도를 가지고, 나머지는 안정화재료로 흐르게 된다.

3.2 줄 열

$\Psi \geq 1$ 상태이면 초전도체가 모든 작동전류를 수용할 수 있으므로 전류분류가 발생하지 않고 줄 열도 발생하지 않는다. $\Psi = 0$ 상태이면 초전도체가 초전도 성질을 완전히 잃어버려 모든 전류가 안정화재료로만 흐르게 된다. 이때는 초전도체에는 전류가 흐르지 않기 때문에 안정화재료에서만 줄 열이 발생한다. $0 < \Psi < 1$ 인 상태이면

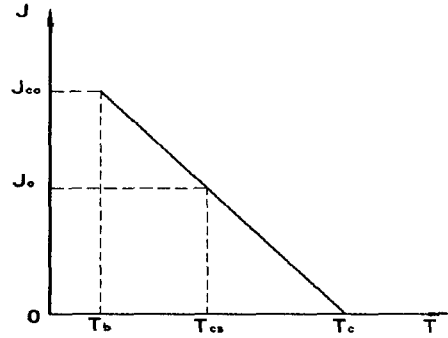


Fig. 136. Critical current density as a function of temperature

작동전류가 초전도체에서 수용할 수 있는 양을 초과하므로 일부 전류는 안정화재료로 흐르게 되고, 초전도체와 안정화재료에서 줄 열이 발생하게 된다. 즉 $\Psi < 1$ 인 경우에 줄 열이 발생한다.

전류분류 상태에서 발생하는 줄 열을 구하기 위해서는 안정화재료의 저항과 안정화재료로 흐르는 전류를 구해야 한다. 식(1)에서 $I_c = I\Psi$ 이므로 안정화재료에 흐르는 전류는 $I_m = I - I_c = (1 - \Psi)I$ 이다. R_m 을 안정화재료의 저항이라면 미소 길이 dx 에 대하여 $R_m = \rho_m(dx/A_m)$ 과 같이 쓸 수 있다. 따라서 안정화재료의 단위부피당 발생하는 줄 열은 식(2)와 같다.

$$q_m = \frac{Q_m}{A_m dx} = I^2 (1 - \phi)^2 \frac{\rho_m}{A_m^2} \quad (177)$$

여기서 안정화재료의 전기비저항 ρ_m 은 식(3)과 같이 Wiedemann-Franz-Lorentz 법칙을 사용하여 구하였다.

$$\rho_m k_m = B T \quad (178)$$

그리고 $\lambda = A_s/A, J_m = I_m/A_m$ 로 정의하면, 식(4)와 같이 된다.

$$q_m = \rho_m J_m^2 \left(\frac{\lambda}{1 - \lambda} \right)^2 (1 - \phi)^2 \quad (179)$$

초전도체에서 발생하는 줄 열을 구하기 위해서 초전도체와 안정화재료에서의 전압차가 일정함을 이용하였다. $\Delta V_m = \Delta V_s = \rho_s J_c(T)$ 이고, $\Delta V_m = \rho_m J_m = \rho_m [(I - I_c)/A_m]$ 이므로, 초전도체의 비저항(ρ_s)은 식(5)와 같다.

$$\rho_s = \frac{1}{J_c(T)} (I_o - I_c) \frac{\rho_m}{A_m} \quad (180)$$

식(5)를 이용하여 초전도체에서 발생하는 줄 열을 구하면 식(6)과 같다.

$$q_s = \rho_m J_m J_c(T) \frac{\lambda}{1 - \lambda} (1 - \phi) \quad (181)$$

그러므로 초전도체와 안정화재료에서의 총 줄 열 발생량은 식(7)과 같이 체적비를 사용하여 구하였다.

$$\begin{aligned} q_t &= \lambda q_s + (1 - \lambda) q_m \\ &= \rho_m J_m^2 \frac{\lambda^2}{1 - \lambda} (1 - \phi) \left[(1 - \phi) + \frac{J_c(T)}{J_m} \right] \end{aligned} \quad (182)$$

3.3 지배방정식

고온 초전도체 테이프의 단면 온도분포를 고려한 해석은 이차원 열전달 형태의 지배방정식을 사용하였고, 전도의 이방성은 고려하지 않았다. 식(8)은 본 연구에서의 지배방정식이다. q_t 는 식(7)과 같이 초전도체와 안정화재료에서 발생하는 총 줄 열을 나타낸다.

$$\gamma c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + q_t - 2 \frac{h}{t} (T - T_b) \quad (183)$$

식(8)에서 우변의 마지막 항은 고온 초전도체 테이프에서 냉각재로 방출되는 열량을 나타낸다. h 는 대류 열전달 계수이고 T_b 는 냉각재의 온도이다. v , c , k 는 혼합체로 가정한 경우의 밀도, 비열, 열전도도로서 식(9)와 같이 초전도체와 안정화재료의 체적비로 가중 평균하여 구하였다.

$$\begin{aligned} \gamma &= \lambda \gamma_s + (1 - \lambda) \gamma_m \\ c &= \lambda c_s + (1 - \lambda) c_m \\ k &= \lambda k_s + (1 - \lambda) k_m \end{aligned} \quad (184)$$

지배방정식에 대한 초기조건 및 경계조건은 다음과 같다.

$$T(x, y, 0) = T_b$$

$$T(L, y, t) = T_b$$

$$\frac{\partial}{\partial x} T(0, y, t) = 0 \quad \text{at} \quad \frac{W}{2} < y < W$$

$$\frac{\partial}{\partial y} T(x, W, t) = -\frac{h}{k} (T(x, W, t) - T_b)$$

$$\frac{\partial}{\partial y} T(x, 0, t) = \frac{h}{k} (T(x, 0, t) - T_b) \quad (185)$$

$$\frac{\partial}{\partial y} T(x, \frac{W}{2}, t) = \frac{h}{k_c} \left(T(x, \frac{W}{2}, t) - T_b \right) \quad \text{at} \quad 0 < x < \delta$$

$$\frac{\partial}{\partial x} T(\delta, y, t) = \frac{h}{k} (T(\delta, y, t) - T_b) \quad \text{at} \quad 0 < y < \frac{W}{2}$$

x 는 길이방향, y 는 폭방향, t 는 시간이고, δ 는 크랙의 x 방향의 폭이다. $x=L$ 일 때의 경계조건은 구리관상의 전류리드이므로 줄 열 발생보다 대류에 의한 냉각이 크다는 가정하에 냉각재의 온도와 같이 주었다.

3.4 수치해석 결과 및 고찰

수치해석에서 사용한 물질의 상태량은 여러 논문을 참조하여 다음 Table.1과 같은 값을 사용하였다.

Table. 1 Properties of Bi-2221 and Ag

	Bi-2223	Ag(at 77K)
k (W/m-K)	1.04 [3]	112.6 [5]
v (kg/m ³)	6.31×10^3 [3]	1.07×10^3 [5]
c (J/kg-K)	1.89×10^2 [3]	1.2×10^2 [5]

초전도체의 임계온도 T_c 는 105(K)로 보았으며[3], 임계전류밀도 J_{co} 는 실험에서 측정된 임계전류를 사용하여 1.02×10^8 (A/m²)를 사용하였다. 그리고 $L=0.07$ (m), $W=0.004$ (m), $\lambda=0.3$, $t=0.0004$ (m), $\delta=0.00012$ (m)이다.

그림 4는 작동전류를 증가시킨후 정상상태에 도달했을때의 xy 평면상에서 온도분포를 도시하였다. 작동전류가 18A일 때 크랙 부분에서만 77.2K정도이고 다른 부분에서는 77K를 유지하고 있다. 그러나 작동전류를 28A로 상승시켰을때에는 크랙 부분의 온도가 78.5K로 상승을 하고 다른 부분으로 전파되는 것을 볼 수 있다. 즉 크랙 부분에서만 전류분류가 일어나고 다른 부분에서는 초전도상태를 그대로 유지하고 있다. 이것은 그림 2에서 크랙이 없는 테이프의 실험결과보다 크랙을 낸 상태에서의 실험결과가 지수승으로 증가하는 기울기가 완만하게 측정되는 이유이다.

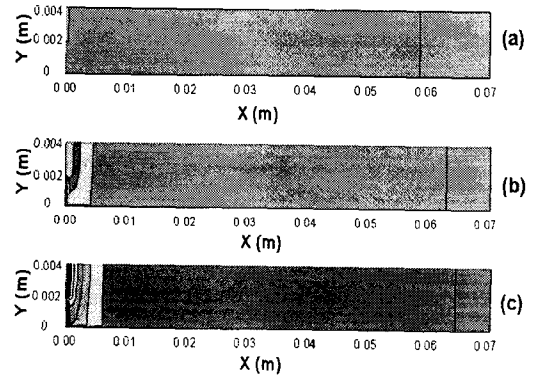


Fig. 137. Temperature distribution with different I_0 ; (a)18A, (b)24A, (c)28A

그림 5는 $y=0.003$ m, $h=1000$ (W/m²-k)에서의 작동전류에 따른 x 방향에 대한 전류분류값($i_m=I_m/I$)을 나타낸 것이다. 작동전류가 21A인 경우를 보면 크랙 부분에서의 전류분류값이 0.3정도, 즉 작동전류의 30%인 7A는 안정화재료로 흐르고 나머지 14A는 초전도체로 흐른다. 작동전류가 28A에서는 크랙 부분에서 안정화재료로 14.27A가 흐르고 초전도체로는 13.73A가 흐른다. 즉 크랙 부분에서는 28A이상의 작동전류가 흐를 때 초전도체로 흐르는 전류보다 안정화재료로 흐르는 전류의 양이 더 많아진다. 또한 29A이상의 작동전류에서는 크랙 부분에서 뿐만 아니라 다른 부분으로까지 전류분류가 확장되는 것을 볼 수 있다.

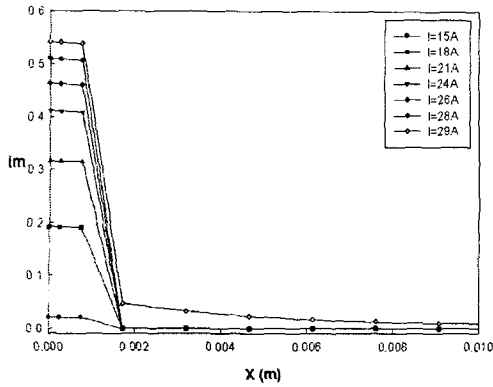


Fig. 138. Current sharing ratio for operating current(I_o) at $y=0.003m$, $h=1000 (W/m^2-k)$

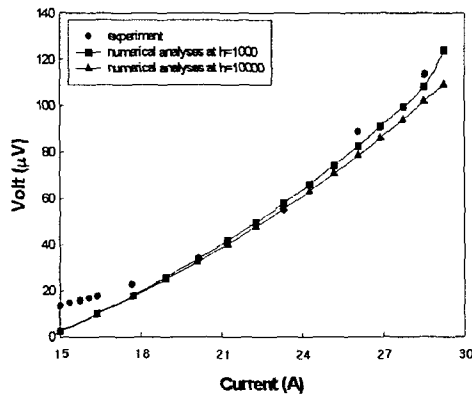


Fig. 139. Comparison of experimental data and numerical results for different convection coefficient

그림 6은 대류 열전달계수에 따른 수치해석의 전류-전압 곡선과 실험에 의해 측정된 전류-전압 곡선을 비교한 것이다. 참조문헌[4]을 보면 대류 열전달계수값을 10^4 단위로 쓰고 있어서 본 연구에서 $10000(W/m^2-k)$ 이라는 값을 사용하였는데 실험값과의 오차가 생겼다. 그리고 실험을 수행중에 고온 초전도체 테이프의 표면에 하얀 성애가 표면을 둘러싸는 현상이 관찰이 되어 대류 열전달계수값을 $1000(W/m^2-k)$ 으로 줄여 적용한 결과 실험값과 매우 유사한 전류-전압곡선을 나타내었다. 그림 6에서 19A이하에서는 실험값과 수치해석값이 다른 양상을 보이고 있다. 즉 실험값은 지수승의 증가를 하는 반면 수치해석값은 선형적인 증가를 나타낸다. 이는 실험상에서는 초전도체가 임계전류 이상의 전류가 흐르면 플럭스-크리프(flux-creep), 플럭스-플로우(flux-flow)상태로 전이되면서 비저항이 지수승으로 증가하는데 반해 수치해석상에서는 이러한

비저항의 지수승 증가를 고려하지 않고 Wiedemann-Franz-Lorentz 법칙을 사용하여 비저항을 온도의 함수로만 사용을 하였기 때문에 나타난 오차로 생각된다.

4. 결론 및 고찰

본 연구에서는 고온 초전도체 테이프에 안정 화재료와 초전도체 모두 크랙을 주고난 후 실험과 수치해석을 이용해 전류-전압의 변화를 비교하고 그에 따른 온도분포를 해석하였다. 온도에 의한 전류분류는 28A이상에서 크랙이 아닌 다른 부분으로 전이되었다. 또한 전류-전압곡선은 대류열전달계수값을 $1000(W/m^2-k)$ 을 주었을 때 실험값과 잘 일치하였다. 이상의 결과에서 초전도체 내에 크랙의 발생이 예측되는 경우 실험을 수행하지 않고 수치해석만으로 크랙의 크기를 예측할 수 있을것으로 사료된다.

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(R01 - 2000 - 00308)지원으로 수행되었음.

[참고 문헌]

- [1] Y. Fang, S. Danyluk, and M.T. Lanagan, " Effects of cracks on critical current density in Ag-sheathed superconductor tape", Cryogenics, Vol.36, pp. 957-962, 1996.
- [2] Y.S. Cha, S.Y. Seol, and J.R. Hull, "Critical current density and dissipation in sintered YBCO filaments", Advances in Cryogenic Engineering, Vol.43, pp. 379-388, 1998.
- [3] 정신근, 설승윤, "고온 초전도체 테이프의 상전도 영역 전파 특성 해석", 한국초전도 저온 공학회 논문지, 3권,1호, pp.11-15, 2001.5
- [4] M.N.Wilson, "Superconducting Magnets", Chapter 5-6, Clarendon Press. Oxford, 1983
- [5] Hyung Sang Park et al, " Characterization of the Thermal Conductivity and Mechanical Properties of Sheath Alloy Materials for Bi-2223 Superconductor Tapes ", IEEE transaction on applied Superconductivity, Vol.11, No.1, 2001
- [6] M.K.Chyu, C.E.Oberly, " Numerical Modeling of Normal Zone Propagation and Heat transfer in a Superconducting Composite Tape ", IEEE transaction on Magnets, Vol.27, No.2, 1991