

크랙에 의한 고온 초전도체 테이프의 임계전류 특성변화

The variation of critical current by the formation of crack in a high-temperature superconducting tape

박을주*, 설승윤**

E. J. Park*, S. Y. Seol**

Abstract : The variation of critical current by the formation of crack in a high temperature superconducting tape was studied by experimental and numerical analyses. The current-voltage relation of HTS tape is measured by the four point measurement method. Numerical analyses are used to solve two dimensional heat conduction equation, considering the temperature distribution. By comparing current-voltage relation of experimental and numerical results, the validity of numerical method is verified.

Key Words : HTS tape, crack formation, current sharing

1. 서 론

고온 초전도체는 취성의 세라믹 재료이기 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 전압이 전류의 지수 n 승으로 증가한다는 일반적인 관측결과를 이용해 지수 n 값을 상수로 놓고 초전도체에서 발생하는 크랙을 대상으로 실험과 수치해석이 이루어졌다[1]. 다심형 Bi-2223/Ag 테이프에 대한 삼차원 해석에 의하면 안정화재와 초전도체의 비율이 일정한 상태로 초전도체 필라멘트의 수를 증가시키면 Bi-2223/Ag 테이프는 안정화재와 초전도체의 혼합물로 볼 수 있음을 보이고 있다[2].

본 논문에서는 기계적 손상에 의한 초전도체와 안정화재료가 동시에 크랙이 발생한 상태에 대한 고온 초전도체 테이프의 임계전류변화에 대한 실험적 연구를 하였다. 또한 유한차분법에 의한 수치해석에서는 온도 분포를 해석하고 전류분류 모델[4-6]을 적용하여 크랙 발생에 의한 임계전류 저하를 예측하였다. 또한 수치해석적인 방법을 사용할 때 Bi-2223/Ag 테이프의 물성치를 안정화재료와 초전도체의 비율로 가중평균하여 사용하였다.

* 학생회원 : 전남대학교 기계공학과 석사과정

** 정 회 원 : 전남대학교 기계시스템공학부 부교수

원고접수 : 2002년 03월 28일

심사완료 : 2002년 05월 15일

2. 실험

2.1. 시편제작

실험에서 사용한 시편은 지그(Jig)를 제작하여 그림 1(a)와 같이 Bi-2223/Ag 테이프를 폭 방향으로 d 만큼 인위적으로 크랙을 주고 (b)와 같이 베크라이트판을 지지대로 사용하여 양단에 전류리드를 장착시킨 후 Bi-2223/Ag 테이프를 전류리드에 댄납을 하여 고정하였다. 여기서 L 은 고온초전도체 테이프의 길이이고 W 는 폭, t 는 두께이다. 전류리드는 구리판상으로 제작을 하였으며 베크라이트판 지지대에 볼트와 너트를 이용하여 고정하였다. 전압차를 측정하기 위하여 100mm간격으로 전압탭을 설치하여 나노 볼트 미터로 측정하였다.

Bi-2223/Ag 테이프의 안정화 재료인 은(Ag)과 초전도체 사이의 열팽창계수가 다르므로 시편 제작 과정에서 많은 일을 하였을 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.

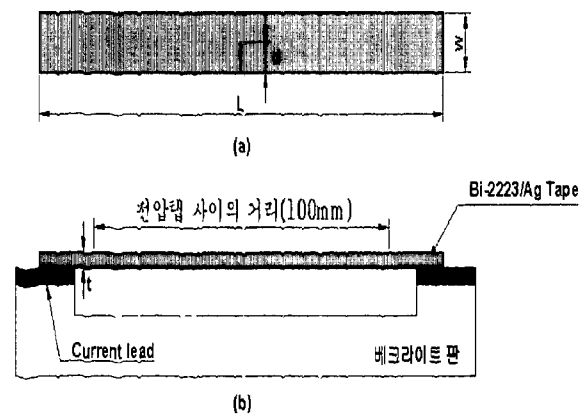


그림 1. 시편 개략도

Fig. 1. Schematic diagram of sample

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 공급 후 안정상태가 되면 전압을 측정하고 다시 0.25A를 증가시켜 전류를 공급하는 방법으로 실험을 수행하였다. Bi-2223/Ag 테이프의 임계전류는 4-point 방법으로 $1 \mu V/cm$ 의 기준에 의하여 측정하였다[3].

Bi-2223/Ag 테이프의 임계측정은 전류를 증가시킨 후 충분히 안정상태에 도달했을 때 측정하였다. 실험을 통하여 측정된 전류-전압곡선은 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/4(1mm), W/2(2mm), 3W/4(3mm)만큼 주었을 때 임계전류는 19.25A, 14.25A, 3.52A이다.

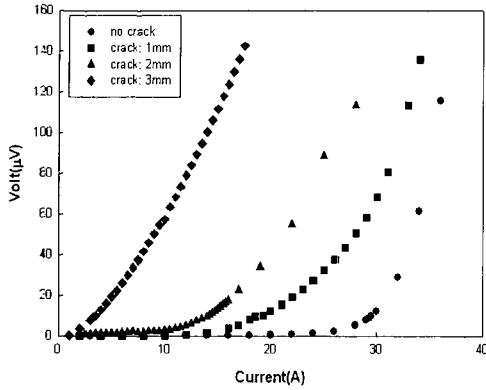


그림 2. 실험결과에 따른 전압-전류곡선
Fig. 2. Experimental results of V-I characteristic relation

그림 2에서 보면 크랙의 크기가 W/2(2mm)까지는 전압과 전류관계를 보면 지수승으로 증가하는 기울기가 완만한데 반해 크랙의 크기가 3W/4(3mm)일때는 지수승으로 증가하는 기울기가 더욱 급하다. 이는 초전도체가 수용할 수 있는 임계전류가 크랙의 크기가 커지면 커질수록 크랙부분에서는 더욱 작아지므로 발생하는 현상이다.

3. 수치해석

3.1. 전류분류 모델

온도(T)에 대한 임계전류밀도(Jc)의 관계는 비선형적인 관계이지만 해석의 편리를 위해 그림 3과 같이 선형적으로 가정하였다[4]. Jco는 냉각제인 액체질소(LN2)에서의 임계전류밀도이다. Tcs는 작동전류밀도 Jo(I=I/As, As=초전도체의 단면적)에서 전류분류가 일어나기 시작하는 온도이고, Tc는 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.

$$\psi = \frac{I_c}{I} = \frac{1}{I} \int_{A_s} J_c(T) dA \quad (1)$$

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 임계전류 밀도를 가지고, 나머지는 안정화재료로 흐르게 된다.

3.2. 줄 열

$\Psi \geq 1$ 상태이면 초전도체가 모든 작동전류를 수용할 수 있으므로 전류분류가 발생하지 않고 줄 열도 발생

하지 않는다. $\Psi = 0$ 상태이면 초전도체가 초전도 성질을 완전히 잃어버려 모든 전류가 안정화재료로만 흐르게 된다. 이때는 초전도체에는 전류가 흐르지 않기 때

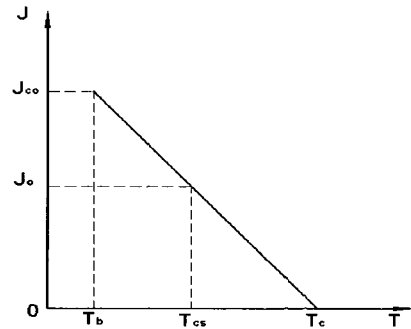


그림 3. 온도에 따른 임계전류밀도 변화
Fig. 3. Critical current density as a function of temperature

문에 안정화재료에서만 줄 열이 발생한다. $0 < \Psi < 1$ 인 상태이면 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. Rm을 안정화재료의 저항이라 하면 미소 길이 dx에 대하여 $R_m = \rho_m(dx/A_m)$ 과 같이 쓸 수 있다. 따라서 안정화재료의 단위부피당 발생하는 줄 열은 식(2)와 같다.

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

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

$$\rho_m k_m = B T \quad (3)$$

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

$$q_m = \rho_m J_m^2 \left(\frac{\lambda}{1 - \lambda} \right)^2 (1 - \psi)^2 \quad (4)$$

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.

$$\rho_s = \frac{1}{J_c(T)} (I_o - I_c) \frac{\rho_m}{A_m} \quad (5)$$

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

$$q_s = \rho_m J_m J_c(T) \frac{\lambda}{1 - \lambda} (1 - \psi) \quad (6)$$

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

$$q_t = \lambda q_s + (1 - \lambda) q_m = \rho_m J_m^2 \frac{\lambda^2}{1 - \lambda} (1 - \psi) \left[(1 - \psi) + \frac{J_c(T)}{J_m} \right] \quad (7)$$

3.3. 지배방정식 및 경계조건

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

$$\gamma c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + q_t - 2 \frac{h}{t} (T - T_b) \quad (8)$$

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

$$\begin{aligned} \gamma &= \lambda \gamma_s + (1 - \lambda) \gamma_m \\ c &= \lambda c_s + (1 - \lambda) c_m \\ k &= \lambda k_s + (1 - \lambda) k_m \end{aligned} \quad (9)$$

지배방정식에 대한 초기조건 및 경계조건은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} T(x, y, 0) &= T_b \\ T(L, y, t) &= T_b \\ \frac{\partial}{\partial x} T(0, y, t) &= 0 \quad \text{at } d < y < W \\ \frac{\partial}{\partial y} T(x, W, t) &= -\frac{h}{k} (T(x, W, t) - T_b) \\ \frac{\partial}{\partial y} T(x, 0, t) &= \frac{h}{k} (T(x, 0, t) - T_b) \\ \frac{\partial}{\partial y} T(x, d, t) &= \frac{h}{k_c} (T(x, d, t) - T_b) \quad \text{at } 0 < x < \delta \\ \frac{\partial}{\partial x} T(\delta, y, t) &= \frac{h}{k} (T(\delta, y, t) - T_b) \quad \text{at } 0 < y < d \end{aligned} \quad (10)$$

x는 길이방향, y는 폭방향, t는 시간이고, δ는 크랙의 x방향의 폭, d는 크랙의 길이이다. 대칭성을 고려하여 y방향으로 d부터 W까지는 단열조건을 주었으며, 냉매와 접하고 있는 부분은 대류에 의한 냉각 조건을 주었다. x=L일 때의 경계조건은 구리판상의 전류리드이므로 줄 열 발생보다 대류에 의한 냉각이 크다는 가정하에 냉각재의 온도와 같이 주었다.

3.4. 수치해석 결과

수치해석에서 사용한 물질의 상태량은 여러 논문을 참조하여 표.1과 같은 값을 사용하였다. 초전도체의 임계온도 Tc는 105K로 보았으며[4], 임계전류밀도 Jco는 실험에서 측정한 임계전류를 사용하여 1.02×108A/m2를 사용하였다. 그리고 L=0.07m, W=4×10-3m, λ=0.27, t=4×10-4m, δ=1.2×10-4m이다.

표 1. Bi-2223와 은(Ag)의 상태량

Table 1. Properties of Bi-2223 and Ag

	Bi-2223	Ag(at 77K)
k (W/m-K)	1.04 [4]	112.6 [7]
v(kg/m3)	6.31×103[4]	1.07×103[7]
c (J/kg K)	1.89×102[4]	1.2×102[7]

해석은 길이방향으로 50개의 격자를 사용하였는데 온도 구배를 고려하여 크랙이 준 부분에는 조밀한 격자가 되도록 하였다. 폭 방향으로는 20개의 격자를 형성하였다.

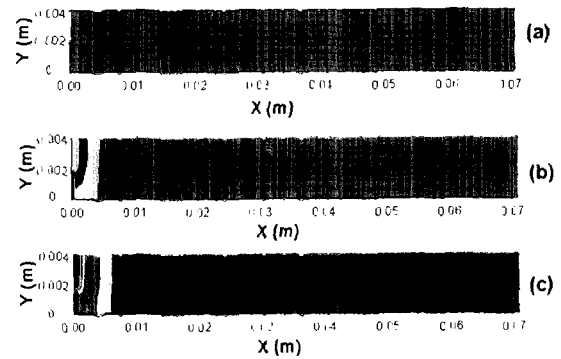


그림 4. 작동전류에 따른 온도분포: (a)18A, (b)24A, (c) 28A

Fig. 4. Temperature distribution with different operating current(Io): (a)18A, (b)24A, (c) 28A

그림 4는 크랙의 크기가 W/2(2mm)인 경우의 작동전류를 증가시킨후 정상상태에 도달했을때의 xy평면상에서 온도분포를 도시하였다. 작동전류가 18A일 때 크랙 부분에서만 77.15K정도이고 다른 부분에서는 77K를 유지하고 있다. 그러나 작동전류를 28A로 상승시켰을때에는 크랙 부분의 온도가 78.3K로 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 추정되는 이유이다. 그러나 크랙의 크기가 3W/4(3mm)인 경우에는 지수승으로 증가하는 기울기가 더 급하게 추정되었다. 이는 온전한 부분보다 크랙부분이 너무 커서 초전도체가 수용할 수 있는 임계전류를 이미 넘어섰기 때문이다.

그림 5는 크랙의 크기가 W/2(2mm)인 경우 y=0.003m, h=1000W/m2-k에서의 작동전류에 따른 x방향에 대한 전류분류 값(im=Im/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 14.7A가 흐르고 초전도체로는 13.3A가 흐른다. 즉 크랙 부분에서는 28A이상의 작동전류가 흐를 때 초전도체로 흐르는 전류보다 안정화재료로 흐르는 전류의 양이 더 많아진다. 또한 29A이상의 작동전류에서는 크랙 부분에서 뿐만 아니라 x=0.034m까지 전류분류가 확장되는 것을 볼 수 있다.

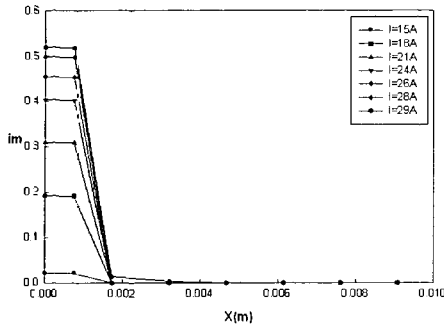


그림 5. d=2mm인 경우 작동전류에 따른 전류분류비
Fig. 5. Current sharing ratio for operating current(Io) at d=2mm, y=0.003m, h=1000(W/m²-k)

그림 6은 크랙의 크기가 W/4(1mm)인 경우 y=0.003m, h=1000(W/m²-k)에서의 작동전류에 따른 x 방향에 대한 전류분류 값을 나타낸 것이다. 그림 5와 마찬가지로 크랙 부분에서 전류분류가 일어나지만 온전한 Bi-2223/Ag 테이프의 임계전류 하에서 작동전류를 증가시키더라도 전류분류가 다른 부분으로 전이되는 것을 볼 수 없다.

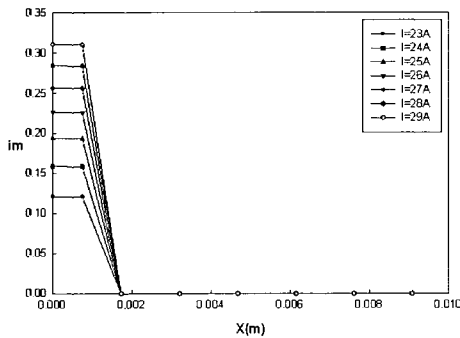


그림 6. d=1mm인 경우 작동전류에 따른 전류분류비
Fig. 6. Current sharing ratio for operating current(Io) at d=1mm, y=0.003m, h=1000(W/m²-k)

그림 7은 크랙의 크기가 3W/4(3mm)인 경우의 작동전류에 따른 전류분류 값을 나타낸 것이다. 그림 7을 보면 전류분류 값은 크지만 그림 5에서 나타난 현상과 매우 유사하다. 작동전류가 28A인 경우에 전류분류가 다른 부분으로 전이가 되는데 x=0.0385m 지점까지 확장되는 것을 볼 수 있다.

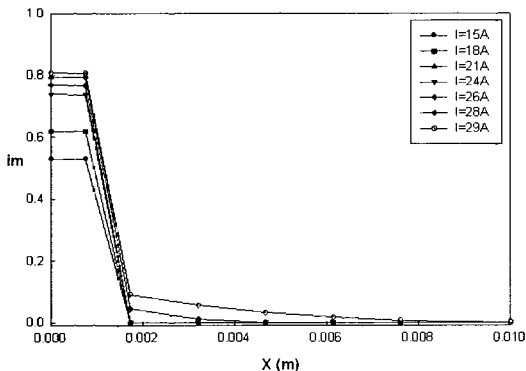


그림 7. d=3mm인 경우 작동전류에 따른 전류분류비
Fig. 7. Current sharing ratio for operating current(Io) at d=3mm, y=0.003m, h=1000(W/m²-k)

4. 실험과 수치해석 결과 비교

실험에서 측정된 전류-전압곡선과 수치해석에서 구한 전류-전압곡선을 비교함으로써 크랙에 의한 임계전류 변화의 특성을 파악할 수 있다.

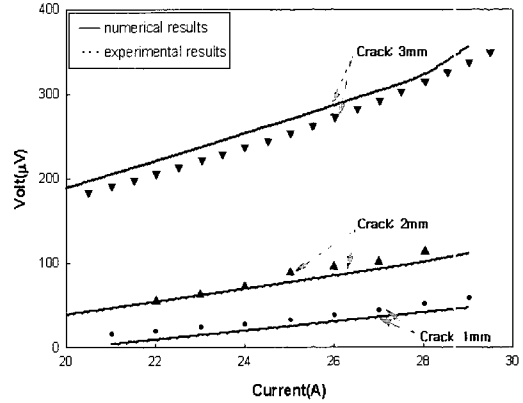


그림 8. 실험과 수치해석 결과 비교
Fig. 8. Comparison of experimental data and numerical results

그림 8은 전류-전압 곡선을 크랙의 크기에 따른 실험과 수치해석 결과를 비교한 것이다. 크랙의 크기가 W/2(2mm)인 경우를 보면 실험값과 수치해석값이 매우 유사한 값을 나타낸다. 그러나 크랙의 크기가 W/2(2mm)보다 작은 W/4(1mm)를 보면 실험값보다 적은 값으로 나타나고, 반대로 큰 3W/4(3mm)를 보면 실험값보다 더 큰 값을 나타내고 있다. 이러한 결과는 대류 열전달계수에 따라 수치해석 방법을 사용할 때 Bi-2223/Ag 테이프의 정확한 물질 상태량에 대한 자료가 충분하지 않고 대류 열전달계수에 따른 수치해석상의 생각이 실험과 차이가 난 것으로 생각된다. 크랙의 크기가 W/2(1mm)인 경우 수치해석을 수행할 때 대류 열전달계수값이 참조문헌[8]을 보면 10⁴단위로 쓰고 있어서 본 연구에서 10000W/m²-k 이라는 값을 사용하였을 때 실험값과의 커다란 오차가 생겼다. 그리고 실험을 수행중에 고온 초전도체 테이프의 표면에 하얀 성애가 표면을 둘러쌓는 현상이 관찰이 되어 대류 열전달계수값을 1000W/m²-k으로 줄여 적용한 결과 실험값과 매우 유사한 전류-전압곡선을 나타내었다. 그러나 다른 크기의 크랙에서는 그림 8과 같이 실험값과 수치해석 결과값이 차이를 나타내고 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 고온 초전도체 테이프에 안정화재료와 초전도체 모두 크랙을 주고난 후 실험과 수치해석을 이용해 전류-전압의 변화를 비교하고 그에 따른 온도분포를 해석하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 대류 열전달계수값을 1000W/m²-k을 주었을 때 크랙의 크기가 W/2(1mm)인 경우에는 실험값과 잘 일치하였지만, 다른 크기의 크랙에서는 약간의 차이가 생겼다.
- (2) 전류분류의 전이는 크랙의 크기가 W/2(1mm)을 기준으로 크면 더 낮은 작동전류에서 발생하고 온도의 상승은 많았으며, 적은 경우에는 임계전류 이하에서

전류분류의 전이가 없고 온도도 냉각재의 온도와 거의 비슷하였다.

(3) 실험과 수치해석상에 나타난 오차는 대류 열전달 계수의 영향이 매우 크다. 따라서 대류 열전달계수를 적용할 때 표면온도를 고려하여 적용해야 할 것으로 사료된다.

(4) 온도에 대한 임계전류밀도의 관계가 비선형적인 관계를 선형적인 관계로 가정하여 사용하였는데 실험값과 수치해석값이 매우 유사하다. 따라서 온도에 대한 임계전류밀도의 관계를 선형적인 관계로 가정하여 사용하여도 무방하다고 사료된다.

이상의 결과에서 초전도체 내에 크랙의 발생이 예측되는 경우 실험을 수행하지 않고 수치해석만으로 초전도체 내에 발생한 크랙의 크기를 예측할 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

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 super-conductor tape", *Cryogenics*, Vol.36, pp. 957-962, 1996.

[2] S.B. Kim and A. Ishiyama, "Transient stability analysis in Bi-2223/Ag superconducting tape", *IEEE Transaction on Applied Superconductivity*, Vol.7, No.2, June 1997

[3] 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.

[4] 정신근, 설승윤, "고온 초전도체 테이프의 상전도 영역 전파 특성 해석", *한국초전도 저온공학회 논문지*, 3권,1호, pp.11-15, 2001.5

[5] M.N. Wilson, "Superconducting Magnets", Chapter 5-6, Clarendon Press. Oxford, 1983

[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

[7] Hyung Sang Park et al, "Characterization of the Thermal Conductivity and Mechanical Properties of Sheath Alloy Materials for Bi-2223 Super-conductor Tapes", *IEEE transaction on applied Super conductivity*, Vol.11, No.1, 2001

[8] J.P. Wu, and H.S. Chu, "Substrate effects on intrinsic stability and quench recovery for thin-film superconductors", *Cryogenics*, Vol. 36, pp.925-935, 1996

저 자 소 개



박을주(朴乙柱)

1975년 12월 06일생, 2000년 조선대 공대 정밀기계공학과 졸업, 현재 전남대학교 대학원 기계공학과 석사과정



설승윤(薛勝允)

1960년 04월 16일생, 1983년 서울대 기계설계공학과 졸업, 1985년 한국과학기술원 기계공학과 졸업(공학석사), 1993년 미국 Texas Tech U. 졸업(공학박사), 현재 전남대학교 기계시스템공학부 부교수