

## 고온 초전도체 테이프의 안정성 해석

정신근\* 설승윤\*\*

### The stability analysis of high-temperature superconductor tape

S.G. Jeong, S.Y. Seol

**Key Words:** HTS tape(고온초전도체 테이프), stability(안정성), quench(퀵치)

#### Abstract

Stability of a Bi-2223/Ag tape was studied by using a numerical method. A numerical modeling has been developed to analyze the dynamic evolution of normal zone in a composite tape Bi-2223/Ag. In this paper, the stability of HTS tape is studied by considering the non-uniform temperature distribution in a cross-sectional area. The finite-difference method(FDM) is used to solve the two-dimensional heat conduction equation. Two kinds of analyses are compared to quantify the critical disturbance energy for quenching HTS tapes. One is the length-thickness( $x-y$ ) side and the other is the length-width( $x-z$ ) side. The results of analyses shows that the critical disturbance energies for each cases seem to be very close for considered Bi-2223/Ag tape.

#### 1. 서 론

초전도체의 안정성 문제는 길이 방향의 일차원 문제, 이차원 문제, 그리고 최근에는 삼차원 문제로 다루어지고 있다. 테이프 형상의 초전도체가 등장하면서 단면의 온도가 일정하다고 가정하여 해석하는 기존의 일차원 해석이 불합리하므로 단면에서의 온도분포를 고려한 해석이 이루어졌다.

S.Y. Seol과 M.C. Chyu는 초전도체의 중심에 교란을 가하여 초전도체의 안정성을 이차원 해석하였다.[1] M.K. Chyu와 C.E. Oberly는 YBCO/Ag의 단심형 테이프 모델에서 초전도체의 중심에 일정시간동안 교란을 가해 길이-두께

방향으로의 안정성을 해석하여 그 결과를 일차원 해석과 비교하였다.[2] S.B. Kim과 A. Ishiyama은 Bi-2223/Ag의 다심형 모델을 형성하여 삼차원 해석을 하였다.[3] 안정체와 초전도체의 체적비를 일정하게 유지한 상태에서 초전도체 핀의 개수를 증가시키면서 해석을 수행하고, 초전도체와 안정체를 혼합체로 가정하여 안정성을 해석하였다. 초전도체 핀의 수가 증가하면 HTS 테이프는 초전도체와 안정체의 혼합물로 볼 수 있고 이 경우 다심형 초전도 테이프와 유사한 안정성 특성이 있음을 논하고 있다. 이지광등은 다심형 테이프 형태를 모델링하여 길이-폭 방향으로의 이차원 해석을 하였다.[4]

초전도 테이프 안정성 문제에 대한 기존의 연구는 길이-두께 방향의 해석이 주를 이루었고, 길이-폭 방향의 해석은 소수에 그치고 있다. 테이프 형상 초전도체의 퀵치특성을 파악하기 위하여 각각 독립적으로 이루어진 길이-두께방향과 길이-폭 방향의 이차원 해석을 비교 분석하여 차이점

\* : 전남대학교 기계공학과 대학원

\*\* : 전남대학교 기계공학과 부교수

과 유사성을 규명하고자 한다. 또한 본 논문에서는 초전도 선재에서의 전류분할 모델을 수학적으로 정확히 기술하여 프로그램에 이용하였다. 기존의 연구에서는 임계전류밀도가 온도에 따라 선형적으로 변화한다는 가정을 많이 이용하고 있으나 본 연구에서 유도한 전류분할 모델은 온도에 따른 비선형적 임계전류밀도 변화에 대해서도 적용할 수 있다.

## 2. 전류분할 모델링

본 연구에서의 안정성 해석은 Fig. 1과 같이 Bi-2223 고온초전도체를 은(Ag)으로 안정화시킨 테이프를 대상으로 하였다. 그리고 발생된 열이 가장 방출되기 어려운 단심형을 가정하였다.

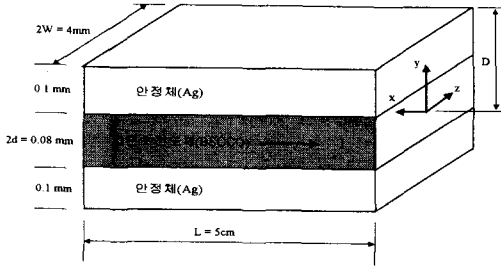


Fig. 1 Analytical model of Bi-2223/Ag tape

초전도체는 온도가 증가하면 초전도체가 수용할 수 있는 임계전류 밀도가 감소하는 물리적 성질을 가지고 있는데 이러한 성질은 Fig. 2와 같다.

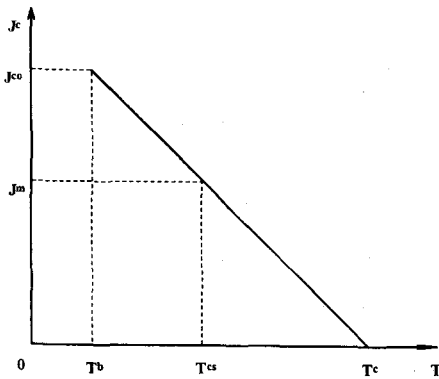


Fig. 2 Critical current density as a function of temperature

Fig. 2는 온도( $T$ )에 대한 임계전류밀도( $J_c$ )를 나타낸다. Fig. 2에서  $J_{c0}$ 는 냉각제인 액체질소의 온도( $T_0=77K$ )에서의 임계전류밀도이다.  $J_0$ 는 작동 전류 밀도이며,  $T_{cs}$ 는 작동전류밀도에서 전류분할이 일어나기 시작하는 온도이다.  $T_c$ 는 임계전류밀도가 "0"이 되는 상태의 임계온도이다.

초전도체는 외부적 교란 또는 내부적 결함 등의 이유로 교란 에너지가 발생하여 초전도 성질을 잃고 전류분할 상태가 발생할 수 있다. 전류분할 상태가 되면 안정체로 전류가 흘러 줄(Joule) 열이 발생한다. 발생하는 줄 열이 냉각되는 양보다 적다면 초전도체는 초전도 성질을 회복하여 안정한 상태가 되지만, 반대의 경우에는 초전도 성질을 잃어버린다. 이처럼 전류분할에 의해 발생하는 줄 열은 초전도체의 안정성 해석에 중요한 요소이다. 즉 안정성을 해석하기 위해서는 전류분할 상태에서 발생하는 줄 열을 구해야 한다.

발생하는 줄 열을 구하기 위하여 전류비  $\psi$  를 다음과 같이 정의한다.

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

식 (1)에서  $A_s$ 는 초전도체의 단면적을 나타낸다. 따라서  $I_c$ 는 초전도체가 초전도 성질을 유지하며 흘러보낼 수 있는 최대의 전류이다. 따라서  $\psi$ 는 초전도체가 수용할 수 있는 최대전류와 실제 흐르는 전류( $I$ )의 비이다.  $1 \leq \psi$  상태이면 초전도체가 모든 작동전류를 수용할 수 있으므로 전류분할이 발생하지 않고 줄 열도 발생하지 않는다.  $0 < \psi < 1$  상태이면 작동전류가 초전도체가 수용할 수 있는 양을 초과하므로 일부 전류는 안정체로 흐르게 되고 초전도체와 안정체에서 줄 열이 발생하게 된다.  $\psi = 0$  상태이면 초전도체가 성질을 완전히 잃어버려 모든 전류가 안정체로만 흐르고 있는 상태이다. 이때는 초전도체에는 전류가 흐르지 않기 때문에 안정체에서만 줄 열이 발생한다. 즉 줄 열은  $\psi < 1$ 인 경우에 발생한다.

전류분할 상태에서 발생하는 줄 열을 구하기 위해서는 안정체의 저항과 안정체로 흐르는 전류를 구해야 한다. 식(1)에서  $I_c = I\psi$  이므로 안정체로 흐르는 전류는  $I_n = I - I_c = (1 - \psi)I$ 이다.  $R_n$ 을 안정체의 저항이라 하면 미소 길이  $dx$ 에 대하여  $R_n = \rho_n(dx/A_n)$ 과 같이 쓸 수 있다. 여기서  $\rho_n$ 은 안정체의 비저항이며,  $A_n$ 은 안정체의 단면적이다. 따

라서 안정체에서 발생하는 줄 열  $Q_n = I_n^2 R_n$  으로서 다음과 같다.

$$Q_n = (I - I_c)^2 \frac{\rho_n dx}{A_n} = I^2 (1 - \phi)^2 \frac{\rho_n dx}{A_n} \quad (2)$$

따라서 단위부피당 발생하는 줄 열은 다음과 같다.

$$q_n = \frac{Q_n}{A_n dx} = I^2 (1 - \phi)^2 \frac{\rho_n}{A_n^2} \quad (3)$$

여기서  $\lambda = A_s/A$ , 그리고  $J_m = I/A_s$ 로 정의하면, 다음과 같이 된다. 여기서  $A$ 는 전체 단면적이다.

$$q_n = \rho_n J_m^2 \left( \frac{\lambda}{1 - \lambda} \right)^2 (1 - \phi)^2 \quad (4)$$

식(4)는 길이(x)-두께(y) 방향으로 해석할 때  $1 < \phi$ 인 경우 안정체에서 발생하는 줄 열을 계산한 값이다.

초전도체에서 발생하는 줄 열을 구하기 위해서 초전도체와 안정체에서의 전압 차가 일정함을 이용한다.  $\Delta V_n = \Delta V_s = \rho_s J_c(T)$ 이고,  $\Delta V_n = \rho_n J_n = \rho_n [(I - I_c)/A_n]$  이므로, 초전도체의 비저항( $\rho_s$ )은 다음과 같다.

$$\rho_s = \frac{1}{J_c(T)} (I - I_c) \frac{\rho_n}{A_n} \quad (5)$$

식(5)를 이용하여 초전도체에서 발생하는 줄 열을 구하고

$$q_s = \rho_s J_c^2(T) = \rho_n J_c(T) \left( \frac{I - I_c}{A_n} \right) \quad (6)$$

여기에  $\lambda$ 와  $J_m$ 를 적용하면 다음과 같다.

$$q_s = \rho_n J_m J_c(T) \frac{\lambda}{1 - \lambda} (1 - \phi) \quad (7)$$

식(7)은 길이(x)-두께(y) 방향으로 해석하는 경우  $1 < \phi$ 일 때 초전도체에서 발생하는 줄 열을 구한 식이다.  $\phi = 0$ 인 경우는  $T > T_c$ 이므로  $J_c(T) = 0$ 이 되어  $q_s = 0$ 이 된다.

길이(x)-폭(z) 방향으로 이차원 해석을 하는 경우에는 안정체와 초전도체가 서로 구분이 되지 않기 때문에 위의 식들을 이용할 수 없다. 길이(x)-폭(z) 방향의 이차원 해석을 하는 경우 발생

하는 줄 열은 체적 비를 이용하여 다음 식(8)처럼 구한다.

$$\begin{aligned} q_t &= \lambda q_s + (1 - \lambda) q_n \\ &= \rho_n J_m^2 \frac{\lambda^2}{1 - \lambda} (1 - \phi) \left[ (1 - \phi) + \frac{J_c(T)}{J_m} \right] \end{aligned} \quad (8)$$

### 3. 지배방정식

초전도체에서의 안정성 해석은 이차원 열전달 형태의 지배방정식을 사용하였고, 전도의 이방성은 고려하지 않았다. 길이(x)-폭(z) 방향으로 해석하는 경우 이차원 열전달 식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \gamma_c c_c \frac{\partial T}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial x} \left( k_c \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_c \frac{\partial T}{\partial z} \right) \\ &+ q_t + q_{al} - \frac{h}{D} (T - T_b) \end{aligned} \quad (9)$$

여기서  $q_{al}$ 은 교란에너지로서 Fig. 1의 초전도 선재의 중심부에 일정시간 동안 가해지는 것으로 모델링 하였다. 길이(x)-폭(z) 방향을 해석대상으로 하면 초전도 테이프의 표면을 통하여 냉각제로 방출되는 열량은 전도 방정식 내에 포함되어야 한다. 식(9)에서 우변 마지막 항이 냉각제로 대류에 의하여 방출되는 열량을 나타낸다.  $h$ 는 대류 열전달 계수이고  $T_b$ 는 냉각제의 온도이다.  $\gamma_c, c_c, k_c$ 는 혼합체로 가정한 경우의 밀도, 비열, 열전도도로서 초전도체와 안정체의 체적비로 가중 평균하여 구한다.

$$\begin{aligned} \gamma_c &= \lambda \gamma_s + (1 - \lambda) \gamma_n \\ c_c &= \lambda c_s + (1 - \lambda) c_n \end{aligned} \quad (10)$$

$$k_c = \lambda k_s + (1 - \lambda) k_n$$

대칭성을 고려하여 Fig. 1의 x-z 좌표 상에서 1상한만을 해석 대상으로 한다. 식(9)에 부가되는 초기조건 및 경계조건은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} T(x, z, 0) &= T_b \\ \frac{\partial}{\partial x} T(0, z, t) &= 0 \\ T(L, z, t) &= T_b \\ \frac{\partial}{\partial y} T(x, 0, t) &= 0 \\ \frac{\partial}{\partial y} T(x, W, t) &= -\frac{h}{k_c} (T(x, W, t) - T_b) \end{aligned} \quad (11)$$

$L$ 은 해석 대상인 테이프의 길이로서 계산에서는 매우 큰 값을 사용하였다.  $W$ 는 테이프 폭의 절반이다.

길이( $x$ )-두께( $y$ ) 방향으로 해석하는 경우에는 초전도체와 안정체가 서로 구분이 되므로 이차원 열전달 방정식은 다음과 같다.

$$\gamma_s c_s \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k_s \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_s \frac{\partial T}{\partial y} \right) + q_s + q_{ds} \quad (12)$$

$$\gamma_n c_n \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k_n \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_n \frac{\partial T}{\partial y} \right) + q_n + q_{dn} \quad (13)$$

$q_{ds}$ 와  $q_{dn}$ 은 각각 초전도체와 안정체에 가해지는 교란 에너지이다. 식 (12)과 (13)에 부과되는 초기조건과 경계조건은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} T_s(x, y, 0) &= T_b & T_n(x, y, 0) &= T_b \\ \frac{\partial}{\partial x} T_s(0, y, t) &= 0 & \frac{\partial}{\partial x} T_n(0, y, t) &= 0 \\ T_s(L, y, t) &= T_b & T_n(L, y, t) &= T_b \\ \frac{\partial}{\partial y} T_s(x, 0, t) &= 0 & & \\ T_s(x, d, t) &= T_n(x, d, t) & & \\ k_s \frac{\partial}{\partial y} T_s(x, d, t) &= k_n \frac{\partial}{\partial y} T_n(x, d, t) & & \\ \frac{\partial}{\partial y} T_n(x, D, t) &= -\frac{h}{k_n} [T_n(x, D, t) - T_b] & & \end{aligned} \quad (14)$$

$D$ 는 테이프 두께의 절반이고,  $d$ 는 초전도체 두께의 절반을 나타낸다.

#### 4. 결과

본 연구에서 사용한 물질의 상태량은 여러 논문에서 사용한 값을 이용하였다.[2,5-7]

Table 1 Properties of Bi-2223 and Ag

	BSCCO	Ag(at 85 K)
$\rho(\Omega\text{-m})$	$10^{-5}$	$4 \times 10^{-9}$
$k(\text{W/m-k})$	1.04	$4.7 \times 10^2$
$\gamma(\text{kg/m}^3)$	$6.31 \times 10^3$	$1.05 \times 10^4$
$c(\text{J/kg-k})$	$1.89 \times 10^2$	$1.7 \times 10^2$

$T_c$ 와  $J_{co}$ 는 각각 105K,  $5 \times 10^8 \text{A/m}^2$ 이고, 액체질

소를 냉각제로 사용하여 초기온도( $T_b$ )는 77K 이다.

본 연구에서 초전도체의 안정성을 해석하기 위하여 길이 방향으로 교란 에너지를  $100 \mu\text{m}$ 에 5ms의 시간동안 가하였다. 그리고 길이( $x$ )-두께( $y$ ) 방향의 해석과, 길이( $x$ )-폭( $z$ ) 방향의 해석을 비교하기 위하여 교란 에너지를 단면 전체에 일정한 밀도로 가하였다. 안정성을 해석하기 위하여 가한 교란 에너지  $\epsilon$ 과 식 (9), (12), (13)의  $q_d$ 의 관계는 다음 식과 같다.

$$\epsilon = q_d V_d t_d \quad (15)$$

여기서  $V_d$ (=단면적 $\times 100 \mu\text{m}$ )는 교란 에너지가 가해진 부분의 체적이며,  $t_d$ (=5ms)는 교란 에너지가 가해진 시간이다.

안정성을 해석하기 위하여 모델을 길이( $x$ )-두께( $y$ ) 방향으로 해석할 때 길이 방향으로 50개, 두께 방향으로 안정체와 초전도체를 각각 10개씩 총 20개의 격자를 형성하였다. 길이( $x$ )-폭( $z$ ) 방향으로 해석할 때는 길이 방향으로 50개, 폭 방향으로 20개의 격자를 형성하였다.

Fig. 3과 Fig. 4는 길이( $x$ )-두께( $y$ ) 방향의 해석에서 각 단면의 전류비  $\psi$ 를 길이에 따라 계산한 결과이다. 작동 전류가 임계전류의 90%일 때 ( $J_m/J_{co}=0.9$ )를 해석한 결과이므로  $\psi$ 의 최대 값은 1.11이다.

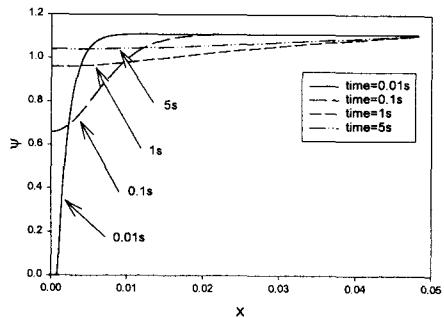


Fig. 3 Evolution of  $\psi$  in the analysis of  $x$ - and  $y$ -direction for  $\epsilon=0.282\text{J}$ ,  $J_m/J_{co}=0.9$

Fig. 3은 교란 에너지  $\epsilon=0.282\text{J}$ 일 때의 해석 결과이다. 시간이 0.01s일 때는 교란 에너지를 가한 지 얼마 되지 않아 교란 에너지가 가해진 중심 부분에서 모든 전류가 안정체로만 흐르는 상태가 나타나며, 전류분할 또한 중심 부분에서만 발생

한다.  $0 < x < 0.00084$  구간에서는 전류비가 제로로서 이 구간에서는 모든 전류가 안정체로 흐르고 있다.  $0.00084 < x < 0.00441$  구간에서는  $0 < \psi < 1$ 로서 전류분할이 일어나고 있음을 뜻한다.  $x > 0.00441$  구간은  $\psi > 1$ 로서 모든 전류가 초전도체로만 흐른다. 교란이 가해진 중심부에서 멀어질 수록 전류비의 값은 1.11에 접근하는데 이는 초전도체 단면의 모든 부분이 77K 부근에 있음을 의미한다.

0.1s일 때는 교란에너지가 전파되어 상전도 영역이 확산되고 있음을 보여준다. 중심 부분( $x=0$ )의 초전도체 온도는 낮아지고 전류비  $\psi$ 가 0.6588로 증가한다. 즉 시간 0.1s에서는  $0 < x < 0.0107$  구간에서 전류분할 상태에 있고  $x > 0.0107$  구간에서는  $\psi > 1$ 인 상태로 초전도체가 모든 전류를 수용하여 전류분할이 없는 상태를 알 수 있다. 시간이 지남에 따라 상전도 영역은 확산되지만 전류비  $\psi$  값은 증가한다. 시간 1s에서도 아직 전류분할 영역이 남아 있으나 5s에서는 전류분할 영역이 없어지고 모든 전류가 초전도체를 통과함을 알 수 있다. 즉 교란에너지를  $\epsilon = 0.282J$ 가할 경우에는 초전도체는 일정 시간동안 상전도 영역이 확산된 후 냉각제의 냉각에 의하여 초전도 성질을 완전히 회복한다.

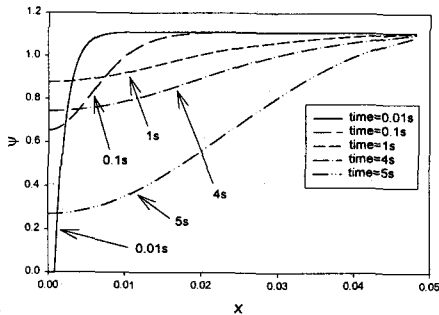


Fig. 4 Evolution of  $\psi$  in the analysis of  $x$ - and  $y$ -direction for  $\epsilon = 0.284J$ ,  $J_m/J_{co} = 0.9$

Fig. 4는  $\epsilon = 0.284J$ 일 때의 해석 결과이다. 시간이 1s일 때까지는 상전도 영역이 확산되면서 전류비 값은 증가하는 형태로 Fig. 3과 비슷한 과정을 보이고 있다. 그러나 1s이후에는 Fig. 3과 다른 양상을 보인다. 시간이 1s일 때는  $x=0$ 에서 전류비  $\psi$  값이 0.878이고  $0 < x < 0.0208$  구간이 전류분할 상태이고, 시간이 4s일 때  $x=0$ 에서 전류비

$\psi$  값은 0.7443이고  $0 < x < 0.0303$  구간이 전류 분할 상태로서 전류분할 영역이 증가하며 중심부분  $x=0$ 에서의 전류비는 감소하는 현상을 보인다. 즉 시간 1s에서 4s 사이에는 중심 부분의 전류분할 정도가 커지며 전류분할 영역은 증가하였다. 이는 초전도체와 안정체에서 발생하는 줄 열이 냉각되는 양보다 많아 켄치되고 있는 현상이다. 시간이 5s일 때는 전류분할의 정도가 더욱 증가하고 있다. 그리고 전류분할 영역의 전파속도도 더욱 빨라지고 있다.

Fig. 3에서 보이듯이 교란에너지가 0.282J에서는 일시적으로 전류분할 영역이 발생하지만 초전도 선재는 다시 초전도성을 회복하였고, Fig. 4에서 보이는 것처럼 교란에너지 0.284J에서는 초기 교란 에너지에 의하여 발생한 전류분할 정도가 점차 감소하다가 다시 증가하여 도체가 켄치됨을 볼 수 있다. 이상에서 길이( $x$ )-두께( $y$ ) 방향으로 해석하는 경우 도체의 켄치 여부를 결정하는 임계교란에너지의 값은 0.282J 이상 0.284J 이하에 존재함을 알 수 있다.

Fig. 5와 Fig. 6은 길이( $x$ )-폭( $z$ ) 방향의 이차원 해석을 작동 전류가 임계전류의 90%일 때 ( $J_m/J_{co} = 0.9$ ) 해석한 결과이다.

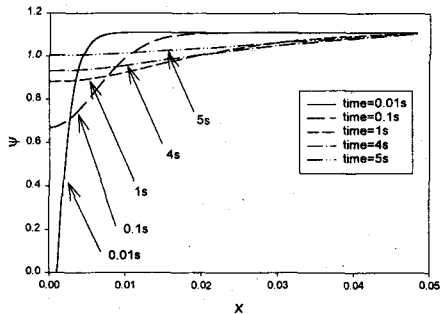


Fig. 5 Evolution of  $\psi$  in the analysis of  $x$ - and  $z$ -direction for  $\epsilon = 0.284J$ ,  $J_m/J_{co} = 0.9$

Fig. 5는 교란 에너지  $\epsilon = 0.284J$ 일 때의 해석 결과이다. Fig. 3처럼 전류분할이 일어나는 영역이 확산된 후 바로 초전도성을 완전히 회복하는 결과를 보인다.

Fig. 6은  $\epsilon = 0.287J$ 일 때의 해석 결과이다. Fig. 3처럼 일정 시간 후 켄치하는 결과를 보인다. Fig. 5와 Fig. 6을 보면 길이( $x$ )-폭( $z$ ) 방향으로 해석하는 경우 초전도체의 켄치 여부를 결정하는

임계교란 에너지는  $0.284 < \epsilon < 0.287$  사이에 존재함을 알 수 있다.

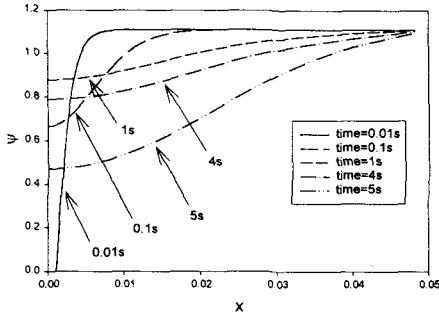


Fig. 6 Evolution of  $\psi$  in the analysis of  $x$ - and  $z$ -direction for  $\epsilon = 0.287J$ ,  $J_m/J_{co} = 0.9$

이상의 결과를 살펴보면 교란 에너지를 단면에 일정하게 가하는 경우 쿼치에 필요한 교란 에너지의 양은 길이( $x$ )-두께( $y$ ) 방향의 해석과, 길이( $x$ )-폭( $z$ ) 방향의 해석이 비슷한 결과를 보인다. 길이( $x$ )-두께( $y$ ) 방향 해석의 경우 임계교란 에너지는  $0.282J$ - $0.284J$  사이에 존재하고, 길이( $x$ )-폭( $z$ ) 방향 해석의 경우 임계교란 에너지는  $0.284J$ - $0.287J$  사이에 존재한다. 즉 길이( $x$ )-폭( $z$ ) 방향으로 해석하는 경우 임계교란 에너지가 조금 더 큰 값이 필요함을 알 수 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 Bi-2223/Ag의 고온 초전도체 테이프의 안정성을 단면 온도분포를 고려하여 해석하였다. 초전도체 전류 분할 모델을 수학적으로 정립하여 줄 열 발생에 대한 식을 정립할 수 있었다. 그리고 길이-두께 방향의 해석과, 길이-폭 방향의 해석을 수행하여 그 결과를 비교하였다. 길이-두께 방향으로 가장 불안정한 형태로 보여지는 단심형 모델에 대하여 해석하고, 길이-폭 방향은 초전도체와 안정체가 혼합된 상태로 가정하여 해석하였다. 길이-두께 방향으로 해석한 경우에는 임계교란 에너지가  $0.282J$ - $0.284J$  사이에 존재하고, 길이-폭 방향으로 해석하는 경우에는 임계 교란 에너지가  $0.284J$ - $0.287J$  사이에 존재한다. 초전도체의 쿼치 여부를 결정하는 임계교란 에너지가 길이-두께 방향의 해석과 길이-

폭 방향의 해석에서 큰 차이를 보이지 않음을 알 수 있었다.

#### 참고문헌

- [1] S.Y. Seol and M-C Chyu, "Stability analysis for a composite superconductor subjected to a linear thermal disturbance," *Supercond. Sci. Technol.* Vol. 7, pp. 841-848, 1994.
- [2] M.K. Chyu and C.E. Oberly, "Numerical modeling of normal zone propagation and heat transfer in a superconducting composite tape," *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 27, No. 2, pp. 2100-2103, March 1991.
- [3] S.B. Kim and A. Ishiyama, "Transient stability analysis in Bi-2223/Ag superconducting tape", *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, Vol. 7, No. 2, June 1997.
- [4] 이지광, 김지훈, 류 경우, 차귀수, 한송엽, "analysis on quench propagation characteristics of HTS tape," *한국초전도 저온공학회논문지*. Vol. 2, No. 1, pp. 35-39, 2000.
- [5] Jorma Lehtonen, Risto Mikkonen, and Jaakko Paasi, "Stability considerations of a high-temperature superconductor tape at different operating temperatures," *Physica C*, Vol. 310, pp. 340-344, 1998.
- [6] Patrick E. Phelan, Rahul N. Samant, "Heat transfer and oxygen diffusion in Ag clad BSCCO superconducting tape", *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, Vol. 9, No. 2, pp. 2718-2721, June 1999.
- [7] J. G. Noudem, L. Porcar, O. Belmont, and M. Barrault, R. Tournier, "Study of the superconducting transition at high pulsed current of bulk Bi-2223 sintered and textured by hot forging," *Physica, C* 281, pp. 339-344, 1997.