

## 고온초전도마그네트 내부의 스트레인에 의한 임계전류밀도 감소 계산

이 인 규 · 나 완 수  
성균관대학교 전기공학과

### Calculation of Critical Current Density Degradation in the HTS Magnet due to Mechanical Strain

Inkyu Lee · Wansoo Nah  
Department of Electrical Engineering, Sung Kyun Kwan University

**Abstract** - In this paper, we describe the mechanical strain effects on the critical current density of HTS (BSCCO) pancake-type-magnet. Firstly the strain of pancake coil is calculated in terms of coil length, which is also a function of angle, and then the critical current density degradation due to strain is calculated along the coil. We assumed that the critical current density degradation pattern is same with that of Nb<sub>3</sub>Sn. We also modelled the effects of magnetic field on the critical current degradation, and the results are compared with those with null magnetic field.

#### 1. 서 론

일반적으로 HTS(High T<sub>c</sub> Superconductor)선재는 기계적인 스트레인에 취약하므로 굽힘스트레인(bending strain)시 선재의 임계전류특성을 저하 시키므로 HTS 마그네트 설계시 이러한 기계적인 스트레인에 의한 임계전류밀도 감소를 예측 할 수 있어야 한다. 본 논문에서는 팬케이크형 HTS 마그네트(HTS pancake magnet) 내부의 기계적 스트레인에 의한 임계전류밀도 감소를 계산하였다. 팬케이크형 HTS 마그네트 제작 방법은 일반적으로 wind-and-react 와 react-and-wind 제조 방법이 있는데 여기서는 후자를 선택하여 계산을 하였다. 이러한 계산은 이미 미국의 S. Patel 이 기계적 스트레인에 의한 임계전류밀도 감소에 대해 계산한바 있으나 [1] 이 경우에는 자장을 고려하지는 않았다. 본 논문에서는 자장을 고려한 기계적 스트레인에 의한 임계전류밀도 감소를 계산한다. 계산된 결과는 HTS 마그네트의 설계시에 유용한 데이터를 제공한다.

#### 2. 팬케이크형 마그네트의 스트레인 계산

그림 1은 팬케이크 코일의 단면을 나타낸다. 이 그림은 테이프 형태의 선재가 나선형으로 권선되어져 있는 상태를 개념적으로 나타내며, 마그네트 상부에서 때 바라본 단면을 기하학적 파라미터와 함께 나타내고 있다. 여기서  $r$ 는 코일을 테이프 형태로 만들어 팬케이크 모양으로 굽힌 후 변화하는 코일 반경을 위치벡터로서  $a$ 의 각도 함수로 나타낸 것이며 (1)식과 같이 나타낼 수 있다.  $s$ 는 코일의 감은 길이를 나타내며 시작점은  $a=0$ 에서부터 하여  $L$  까지 표시 할 수 있다.  $L$ 은 테이프의 총 길이를 가리킨다.  $x$ 는 곡률(curvature)을 의미하며 곡률반경은  $1/x$ 로 나타낼 수 있다.  $a$ 가 점점 증가하면서 코일의 길이에 대한  $x$ 를 (4)식을 이용하여 계산할 수 있다.

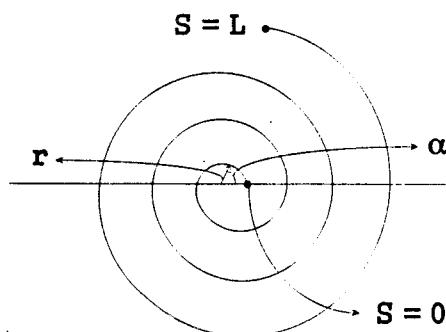


그림 1. 팬케이크형 마그네트 단면도 및  
기하학적 파라미터

Fig 1. Cross sectional view of pancake magnet and geometrical parameters

$$\mathbf{r} = \left( r_o + \frac{\alpha}{2\pi} t \right) (\cos \alpha i + \sin \alpha j) \quad (1)$$

$$r = |\mathbf{r}| = r_o + \frac{\alpha}{2\pi} t \quad (2)$$

$$s = \int (r' \cdot r')^{\frac{1}{2}} da \quad (3)$$

$$x(\alpha) = \left[ \frac{(r' \cdot r')(r'' \cdot r') - (r' \cdot r'')^2}{(r' \cdot r')^3} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

$$\epsilon(s) = \frac{t_f(x-x_b)}{2} \quad (5)$$

$$\text{단, } \mathbf{r}' = \frac{d\mathbf{r}}{da}, \quad \mathbf{r}'' = \frac{d^2\mathbf{r}}{d^2a}$$

$t_f$ 는 테이프 형태의 코일에서 film 두께를 의미하며  $t_o$ 는 테이프의 총 두께를 나타낸다. 여기서 스트레인  $\epsilon(s)$ 는 film 두께  $t_f$ 와 곡률(curvature)  $x$  크기에 따라 정해진다. 따라서 윗 식 전체는  $a$ 의 함수로서 임의의 거리에 있는 테이프의 스트레인 크기를 (5)식과 같이 나타낼 수 있다. 권선 전의 초전도 테이프의 형태가 스트레스를 받지 않는 일직선상에 있다고 가정하면, 즉 react-and-wind의 방법으로 권선을 하였다면, 식 (5)에서의 권선 전의 곡률은 0 ( $x_b=0$ ) 이 된다. 이 경우 테이프의 스트레인 또한 0. 즉  $\epsilon(s)=0$  이 된다.

권선후 굽힘 스트레스에 의한 스트레인의 변화가 일어나게 됨으로 임계전류밀도의 감소는 이러한 스트레인의 정도에 따라 영향을 받는다. 테이프 시작점에서 임의의 거리  $s$ 에 대한 스트레인의 크기를 수식 (5)을 이용하여 계산해 봄으로서 수치적으로 그 크기를 계산할 수 있다.

### 3. 스트레인에 의한 임계전류밀도 저감효과

$$J_c = \frac{J_c(\epsilon, s)}{J_c(\epsilon=0, s)} = A_0 \cdot e^{-A_1(\epsilon - \epsilon_{irr})}, \quad \epsilon > \epsilon_{irr} \quad (6-a)$$

$$J_c = \frac{J_c(\epsilon, s)}{J_c(\epsilon=0, s)} = 1, \quad \epsilon \leq \epsilon_{irr} \quad (6-b)$$

React-and-wind 제조기술로 팬케이크 코일을 제작시 벤딩에 의한 임계전류밀도의 저하가 발생하며, 스트레인에 의해서 그 저하의 정도를 (6-a), (6-b)로서 표현할 수 있다. 수식에서  $A_1=1$ 을 취했으며, 이것은 스트레인 변화가 0.1(%) 일때 임계전류밀도가 10(%) 감소하는 계수값으로 취하였다. 초전도체의 이러한 임계전류밀도 감소는 전도체의 물성적구성과 제조기술에 따라 각각 다르게 나타날 것이다.  $J_c$ (nomalized critical current density)는 '권선후' 코일의 임

의의 거리  $s$ 에서 임계전류밀도의 감소를 의미하며  $\epsilon_{irr}$ 은 스트레인 한계점을 나타낸다. 과거 초전도체의 실험적 데이터에 의해 보고된  $\epsilon_{irr}$ 값을 보면 Bi-2223=0.075(%), Bi-2 212=0.15(%), 멀티필라멘트 Bi-2212 테이프는 0.225(%)로 측정되었다[1].  $A_0$ 는 자장이 존재할 경우 자장을 고려한 감소계수로서 본 논문에서는  $B = 6[T]$  일때의  $A_0=0.512$ 로 Nb3Sn의 실험데이타를 최소자승법(Least square method)으로 선정한 값이며 자장이 없을 때는  $A_0=1$ 이다.

### 4. 임계전류밀도의 판별기준

그림 2는 임의의 스트레인에서 초전도체의 I-V curve로서 임계전류밀도 기준은 전류를 훌렸을 때 단위 길이(cm)당  $1\mu V$ 의 전압이 발생하는 것을 기준으로 하여 선정하였다. 식 (7)은 그림 2를 수식으로 표시한 것이다.  $E_0$ 는  $J_c(\epsilon)$ 를 나타내는데 적용한 값이고  $n(\epsilon)$ 은 I-V curve를 나타내는 멱지수이다. 여기서  $A_2, A_3$ 는 상수값으로서 멀티필라멘트 초전도체( $Nb_3Sn$ )에서 curve fitting의 가장 근접정수로 산정한 계수이다.  $A_2, A_3$ 의 값은 단지 이 논문을 설명하기 위한 예로서 취한것으로서, 임의의 주어진 전도체에서는 실험적 데이터를 통해 결정해야 할 것이다. I-V curve에서  $1\mu V$  윗부분은 초전도체 안정도의 범위를 벗어나는 것으로 볼 수 있다. 스트레인이 커질수록 임계전류밀도가 점점 감소함을 알 수 있다.

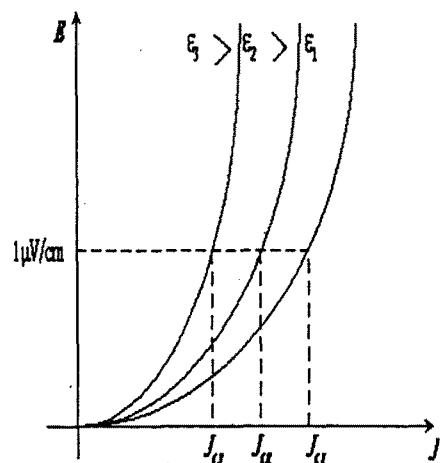


그림 2. I-V curve에 의한 임계전류밀도기준  
Fig 2. Critical current density criteria of I-V curve

$$\frac{E(\epsilon)}{E_0} = \left[ \frac{J(\epsilon)}{J_c(\epsilon)} \right]^n \quad (7-a)$$

$$n(\epsilon) = 1 + A_2 e^{-A_3(\epsilon - \epsilon_{irr})} \quad \epsilon > \epsilon_{irr} \quad (7-b)$$

$$n(\epsilon) = 1 + A_2 \quad \epsilon \leq \epsilon_{irr} \quad (7-c)$$

단,  $E_0$ : Electric field,

$J_c(\epsilon)$ : Critical current density

$A_2$ : 14 (constant),  $A_3$  : 6 (constant)

## 5. 계산 결과

### 5.1 자장을 고려하지 않았을 경우

그림 3 은 테이프의 길이에 따른 임계전류밀도(Normalized critical current density)의 변화를 식 (6-a), (6-b)을 이용하여 그래프로 나타낸 것이다.  $\epsilon_{irr}$ 이 0, 0.1, 0.2% 일 때에 각각의 경우를 비교해 보면  $\epsilon_{irr}$ 이 커지는 것에 비례하여 임계전류밀도의 값이 더 증가한다. Short sample 을 가지고 나타낸 임계전류밀도들은  $\epsilon_{irr}$  값이 큰 것일수록 전반적인 성능이 더욱 향상된다.

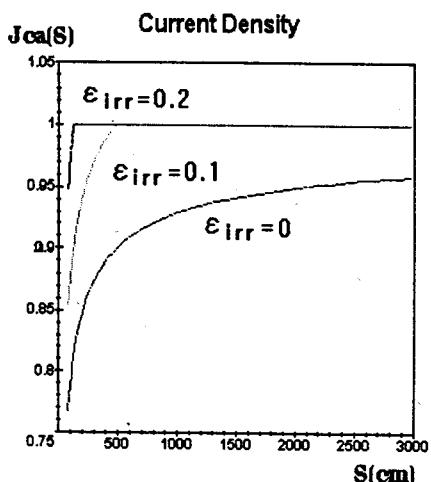


그림 3. 거리에 대한  $J_c$ 의 감소효과 ( $B=0$ )

Fig 3.  $J_c$  vs.  $s$  ( $B=0$ )

그림 4 에서는 테이프 길이에 따른 전기장의 변화를 보여주고 있다. 식 (7-a)를 이용하면 권선후의 전기장을 아래와 같이 다시 쓸 수 있다.

$$\frac{E(\epsilon, s)}{E_0} = \left[ \frac{J(\epsilon, s)}{J_{cb}} \right]^n \left[ \frac{J_{cb}}{J_c(\epsilon, s)} \right]^n \quad (8)$$

식 (8) 의  $J(\epsilon, s)/J_{cb}$  는 동작전류에 따라서 일정

한 값  $C$  를 갖게된다. 그림 4 (a)에서  $C_1$ 를 제외한 나머지  $C_2 \sim C_5$ 는 전반적으로  $E_0$  ( $1\mu V/cm$ ) 이하의 조건을 만족시키며, 그림 4 (b) 의  $C_1 \sim C_5$ 의 경우에는  $E_0$  이하 임을 알 수 있다.  $\epsilon_{irr}=0$  과  $\epsilon_{irr} = 0.1\%$  일 때를 비교해 보면,  $\epsilon_{irr}$  값이 클수록 더 낮은 electric field를 나타낸다.

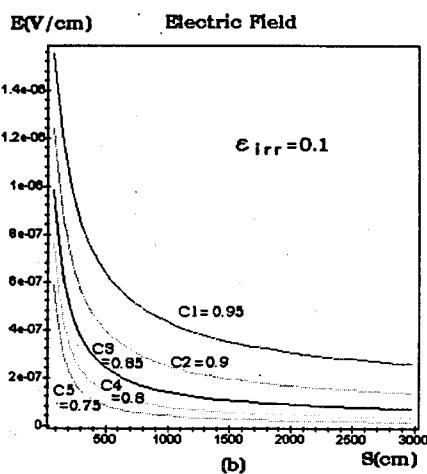
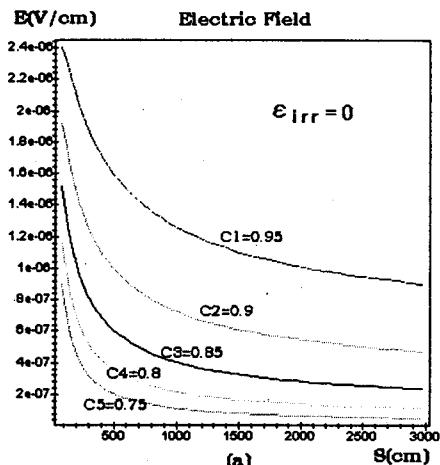


그림 4. 코일 길이에 따른 전기장의 변화 ( $B=0$ )

Fig 4. Variation of electric field along length ( $B=0$ )

### 5.2 자장을 고려할 경우

식 (6-a)에서의  $A_0$ 는 자장을 고려한 계수로서 3 장에서 기술한 바와 같이  $A_0=0.512$  를 선정하여 수식을 전개하였다. 그 결과를 그림 5에 나타내었다. 여기서 자장을  $B = 6(T)$ 로 취하여 계산하였으며, 그림 3과 비교해 보면 이 경우  $J_{ca}$  의

값이 자장이 없었던 경우에 비해 약 2 배 정도 더 작은 값으로 나타남을 볼수 있다.  $\epsilon_{irr}$ 의 크기에 따른 변화는 자장이 없을 경우와 마찬가지로  $\epsilon_{irr}$ 이 증가할수록  $J_c$ 가 더 큰값을 가짐을 알수 있다.

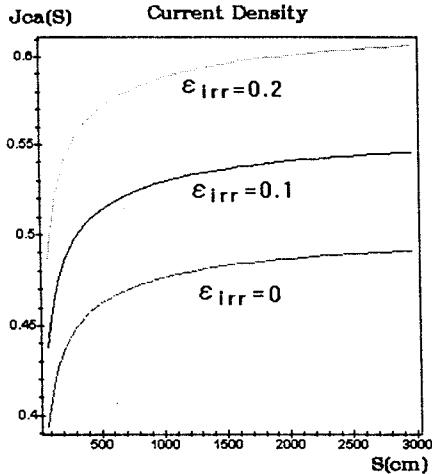


그림 6

그림 5. 거리에 대한  $J_c$ 의 감소효과 ( $B=6$ (T))

Fig 5. Fig 3.  $J_c$  vs.  $s$  ( $B=6$ (T)).

앞의 경우와 같은 조건하에서 자장( $B=6$ [T])을 고려하여 식 (8)을 적용시켜 계산해보면 그림 6 과 같이 된다. 그림 4 (a), (b) 와 비교해 보면 자장이 없을 경우 보다는 자장이 있을 경우에 전기장이 더 작은 값을 가짐을 알 수 있다.  $J_c$ 와 마찬가지로 전기장에서도 그 차이가 대략 2배 정도가 나타난다. 따라서 그림 6의 경우를 보면  $C_1 \sim C_5$ 의 경우 모두  $E_0$  ( $1\mu V/cm$ )이하 의 값을 보여준다.

## 6. 결 론

팬케이크 코일의 전반적인 성능은 고온초전도도체의 제조기술(기하학적 결합구조)과 기계적 스트레인 효과에 의한 임계전류밀도 영향에 의해서 결정된다. 따라서 HTS 초전도 마그네트에 있어서 초전도체 테이프의 벤딩에 의한 스트레인의 효과가 임계전류밀도에 미치는 영향을 예측할 필요가 있다. 본 논문에서는 초전도체 테이프에 자장이 존재할 경우와 존재하지 않은 경우에 대하여 각각 스트레인에 의한 임계전류밀도의 감소치를 계산하였다. 본 연구에 사용된 계수들은 Nb<sub>3</sub>Sn의 데이터를 사용하여 계산한 것이며 앞으로의 연구에서는 고온초전도체의 데이터를 이용하여 전류밀도의 감소를

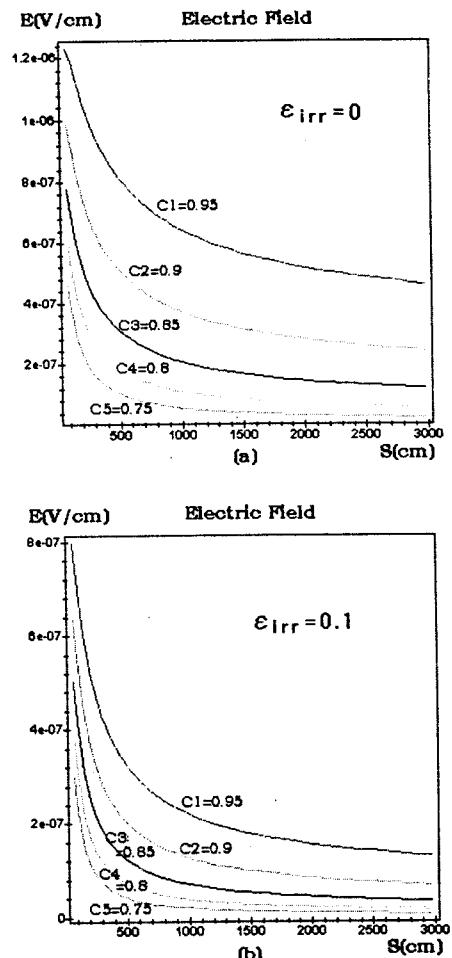


그림 6. 코일 길이에 따른 전기장 ( $B=6$ (T))  
Fig 6. Variation of electric field along length ( $B=6$ (T))

계산하고, 실제 측정된 값과 비교 검토할 예정이다. 아울러 고온초전도 마그네트의 임계전류밀도의 기준치 설정에 대한 문제도 제시할 예정이다.

본 연구는 한국전력공사의 지원에 의하여 기초전력공학공동연구소 주관('95)으로 수행되었음을 밝힙니다.

## 참 고 문 현

- [1] S. Patel, Cryogenics Volume 34, Number 4, 1994
- [2] Clark,A.F.and Ekin,J.W. IEEE Trans Magn (1977)MAG-13(1)38-40
- [3] Ekin, J.W. Alpp Phys Lett(1976) 29(3) 216-219