

# 고온초전도 테이프의 임계전류밀도 분포 해석

강준선, 나완수, 권영길\*, 손명환\*, 김석환\*  
 성균관대학교 전기전자및컴퓨터공학부, 한국전기연구원 초전도응용연구그룹\*

## Critical Current Density Distribution Analysis of HTS Tape

Joonsun Kang, Wansoo Nah

Young Kil Kwon\*, Myung Hwan Sohn\*, Seog Whan Kim\*

School of Electrical and Computer Engineering, Sungkyunkwan Univ.  
 Applied Superconductivity Lab., Korea Electrotechnology Research Institute\*

bigbear@ece.skku.ac.kr

**Abstract** - It is well known that the critical current of a HTS tape has anisotropic characteristic in magnetic field. We are interested in critical current density distribution of a HTS tape. We assumed the experimentally obtained  $I_c$ - $B$  curves do represent the local properties of HTS tapes and calculated the critical current density distribution of HTS tapes using numerical method. Also we predicted the critical current of the tapes.

### 1. 서 론

고온초전도(HTS) 테이프는 자계의 방향에 따라 비등방성을 갖는다는 것은 잘 알려져 있다. HTS의 임계전류는 자계의 영향을 크게 받는다. 특히 HTS 테이프의 넓은 면에 대해 수직인 방향의 자계에 의해 임계전류 특성은 급격히 감소한다. 본 논문에서는 이러한 HTS 테이프의 특성을 고려하여, 단면의 임계전류밀도 분포를 해석하고, 테이프 두 개를 적층하였을 때 각각의 흐르는 전류 방향에 따라 서로 같은 방향으로 흐르는 경우, 서로 반대 방향으로 흐르는 경우를 나누어 임계전류밀도 분포를 비교 분석하였다. 또한 임계전류밀도 분포를 이용하여 임계전류를 계산하였다. HTS 테이프의 임계전류밀도 분포 해석은 HTS 테이프의 자계에 대한 임계전류 특성을 나타내는  $I_c$ - $B$  실험 곡선과 간단한 알고리즘을 적용한 수치적인 방법을 이용하였다.

### 2. 해석 모델

일반적으로 외부 자계를 이용하여  $I_c$ - $B$  곡선을 얻는다. 외부 자계의 크기를 증가시키면서 각 방향에 대해 Fig. 1과 같은  $I_c$ - $B$  곡선을 얻을 수 있다. 그리고 테이프 단면적을 이용하여  $J_c$ - $B$  곡선을 얻을 수 있다. 실제 테이프는 외부 자계

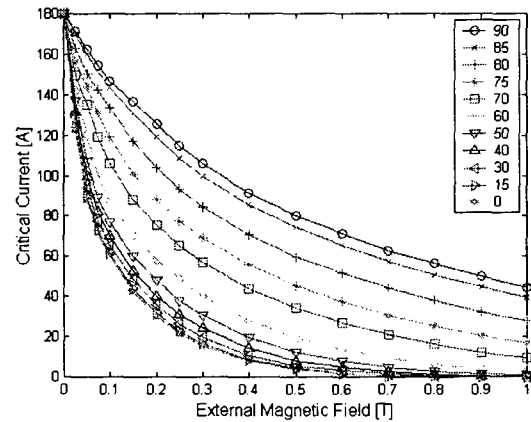


Fig. 1. Experimental  $I_c$ - $B$  curves

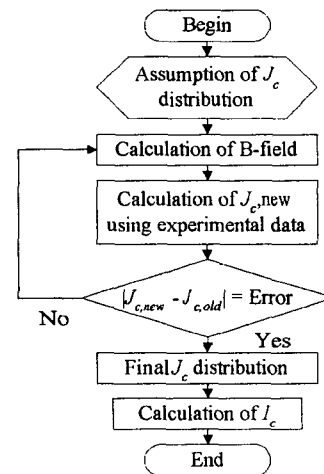


Fig. 2. Flow chart for the calculation of  $J_c$  distribution

와 자기 자계를 더한 만큼 영향을 받는다. 여기서 관심 있는 부분은 테이프 단면의 임계전류밀도 분포이므로 테이프 단면의 임의의 점에서 임계전류밀도,  $J_c$ 를 결정하기 위해, 실험을 통해 얻은  $J_c$ - $B$  곡선을 이용할 수 있다. 그러나 실험

Table 1. Specification of Bi-2223 tape

폭 (mm)	4.1
두께 (mm)	0.3
필라멘트 수	55
은비 $A_{ag}/A_{sc}$	2.55



Fig. 3. Cross sectional area of a HTS tape

을 통해 얻은  $J_c$ -B 곡선은 실제 테이프 단면 임의의 점에서의 특성을 나타내지는 못한다. 왜냐하면 실험 곡선의 임계전류는 테이프 단면의 평균치를 의미하고, 또 자기 자계에 의해 자계 분포가 균등하지 않기 때문이다. 하지만 본 논문에서는  $J_c$ -B 실험 곡선이 실제 HTS 테이프 단면 임의의 점에서의 특성을 나타낸다고 가정하고, 초전도체 전류밀도가 아닌 전전류밀도를 이용하였다[2].

기본적으로 해석은 HTS 단면은 구조적으로 균등하며, 전류는 자기 자계의 영향에 의해서만 분포된다는 가정하에 이루어졌다. Fig. 2는 테이프 단면의 임계전류밀도 분포를 계산하는 과정을 나타내는 계산 흐름도이다. 먼저 테이프 단면의 임계전류밀도 분포가 균일하다고 가정하고 다음 자계 분포를 계산한다. 여기서 구한 자계 분포와  $J_c$ -B 곡선을 이용하여 테이프 단면의 임의의 각 지점에서 새로운  $J_{c,new}$ 를 계산한다. 그 다음  $J_{c,new}$ 와 이전의 임계전류밀도 분포,  $J_{c,old}$ 를 비교하여 오차 범위 내에 있는지를 검사한다. 이 과정에서 테이프 단면의 임의의 각 지점에서 모든 값들이 오차 범위 안에 들어오면  $J_{c,new}$ 를 이용하여 임계전류를 계산하고 계산을 끝낸다. 그러나 오차 범위 안에 들지 못하면  $J_{c,new}$ 를 이용하여 다시 자계 분포를 계산하는 과정으로 돌아가 오차 범위를 만족할 때까지 이러한 과정을 반복한다. 보통 한 번 계산하는 과정에서 20번 정도의 반복을 하며, 오차 범위는  $10(A/m^2)$ 이다.

### 3. 계산 결과 및 토의

계산에 사용한 Bi-2223 테이프의 사양과 단면의 모양은 table 1과 fig. 3에 나타나 있다.  $I_c$ -B 곡선은  $90^\circ$ ,  $85^\circ$ ,  $80^\circ$ ,  $75^\circ$ ,  $70^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $50^\circ$ ,  $40^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $15^\circ$  그리고  $0^\circ$ (c-축에 대해)에 대해  $0\sim 1(T)$ 사이에서 측정했으며, fig. 1에 잘 나타나 있다. 또한 모든 실험은  $77(K)$ 에서 이루어진 것이다.

앞에서 설명한 해석 방법을 이용하여 세 가지 경우에 대해 임계전류밀도 및 자계 분포를 계산하였다. 첫 번째는 하나의 테이프에 대해(Fig. 4), 두 번째는 두 개의 테이프가 적층되어 있고 같은 방향으로 전류를 흘릴 때(Fig. 5) 그리고 마지막으로 두 개의 테이프가 서로 반대 방향으로 전류

를 흘릴 때이다(Fig. 6). Fig. 4와 5의 경우는 전류의 방향이 모두 동일하므로 임계전류밀도 분포(a)와 자계 분포(b)가 비슷한 양상을 나타내고 있으며 하나일 때보다 테이프가 두 개일 때 전류밀도 분포가 중심으로 모이는 것을 알 수 있다. 하지만 Fig. 6의 전류 방향이 서로 다른 경우 앞의 경우와는 매우 다른 경향을 보인다. 임계전류밀도 분포(a)의 경우 테이프의 양쪽 끝을 제외한 부분은 매우 균일한 분포를 나타내고 있다. 이는 Fig. 6(b)의 세 번째 그림, 자계의 y-축 성분 분포에서도 나타나듯이 임계전류의 특성을 감소시키는 자계의 y-축 성분이 매우 작은 값으로 고르게 분포되어 있기 때문이다.

이와 같이 전류의 방향에 따른 임계전류밀도 분포 및 자계 분포의 특징은 임계전류 계산 결과에도 나타난다. Fig. 7에서 Fig. 9는 앞의 세 가지 경우에 대한 임계전류를 계산한 것이다. 그리고 Fig. 8와 Fig. 9의 임계전류 값은 실험 데이터와 비교하기 위해 전체 계산 값 중 테이프 하나의 계산 값만을 나타낸 것이다. 각 임계전류 계산 그림에서 볼 수 있듯이  $0.1(T)$  이하에 해당하는 영역에서는 실험 데이터와 큰 차이를 보이는 것을 알 수 있다. 이러한 원인은  $I_c$ -B 실험 곡선이 테이프 단면의 임의의 점에서의 실제 특성을 나타낸다는 가정 하에 계산을 했기 때문이다. 즉 실험 곡선의 외부 자계 축이 자기 자계를

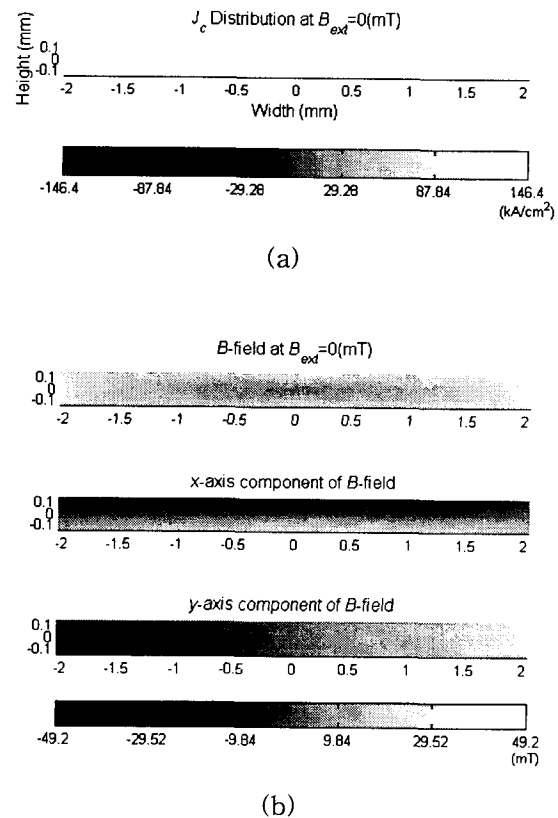
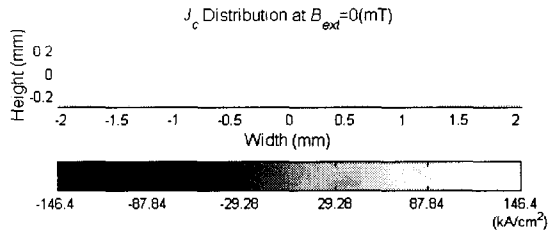
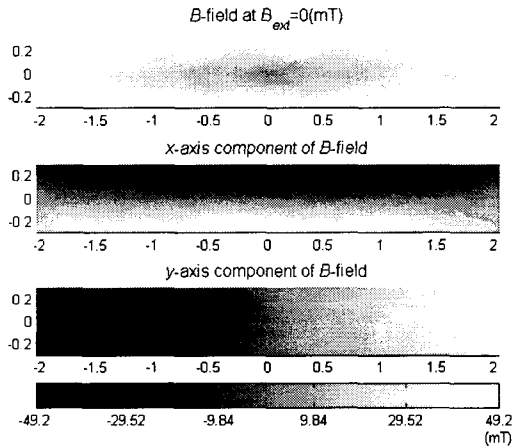


Fig. 4. The calculation results of the single tape, (a)  $J_c$  distribution and (b) B-field distribution: each row means the magnitude, x-axis component and y-axis component of B-field.



(a)



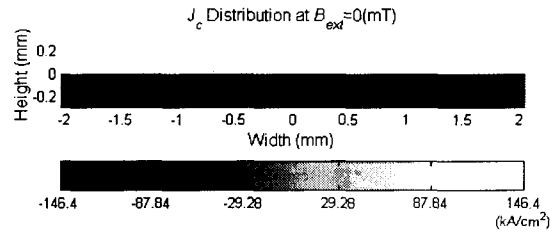
(b)

Fig. 5. The calculation results of the two stacked tapes in which current flow in same directions, (a)  $J_c$  distribution and (b) B-field distribution: each row means the magnitude, x-axis component and y-axis component of B-field.

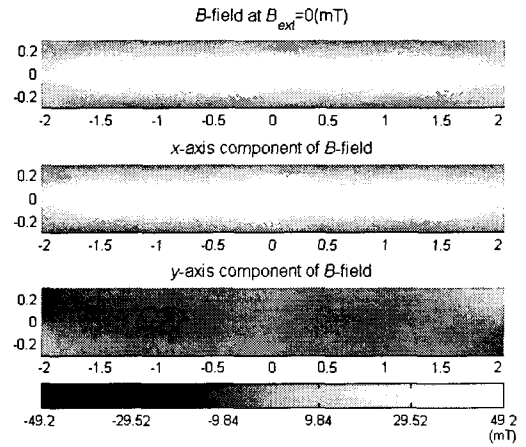
포함하지 못하기 때문이다. 특히 임계 전류가 높은 HTS 테이프일수록 이러한 현상이 크게 나타난다. 결과적으로 0.1(T) 이하의 부분에서는 외부 자계에 비해 자기 자계의 크기가 상대적으로 크기 때문에 계산 상의 오차가 매우 크다. 하지만 외부 자계의 크기가 증가할수록 자기 자계의 영향력이 줄어들므로 계산치는 실험치와 매우 잘 맞는다. 그리고 임계전류가 상대적으로 낮은 경우, 예를 들어 32(A)인 경우, 자기 자계의 영향이 작기 때문에 Fig. 10에서와 같이 외부 자계가 작은 영역에서도 계산치가 비교적 잘 맞는다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 HTS 테이프의 임계전류밀도 분포 및 임계전류를 수치적인 방법을 이용하여 해석해 보았다. 테이프 하나인 경우와 두 개의 전류 방향이 같은 테이프의 경우, 임계전류밀도 분포와 자계 분포에서 비슷한 양상을 보이며 하나일 때보다 두 개인 경우 자계의 영향에 의해 임계전류가 다소 감소함을 알 수 있다. 그리고 두 개의 전류 방향이 서로 반대로 흐르는 테이프



(a)



(b)

Fig. 6. The calculation results of the two tapes in which current flow in opposite directions, (a)  $J_c$  distribution and (b) B-field distribution: each row means the magnitude, x-axis component and y-axis component of B-field.

의 경우, HTS 테이프의 임계전류 감소에 매우 큰 영향을 끼치는 y-축 자장 성분이 서로 상쇄되어 테이프 하나인 경우보다 오히려 작은 값들로 고르게 분포됨을 알 수 있다. 또한 임계전류 계산 결과에서 나타나듯이 자기 자계의 영향이 외부 자계의 영향보다 큰 영역에서는 계산 오차가 다소 크게 나타난다. 하지만 전류의 방향이 서로 반대인 두 개의 테이프에서는 자기 자계의 효과가 서로 상쇄됨을 알 수 있다. 이상의 결과로 볼 때 HTS 테이프의 임계전류밀도 분포 및 임계전류 해석을 통해 임계전류 특성을 감소시키는 자기 자계의 영향을 효과적으로 파악하고 줄일 수 있는 방법을 모색하는데 큰 도움이 될 것으로 판단된다.

또한 차후 전류의 방향이 서로 반대인 두 개의 테이프에 대해서는 실험을 통해 계산치와 비교가 이루어져야 할 것이다.

본 연구는 21세기프론티어 연구개발사업인 차세대초전도응용기술개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

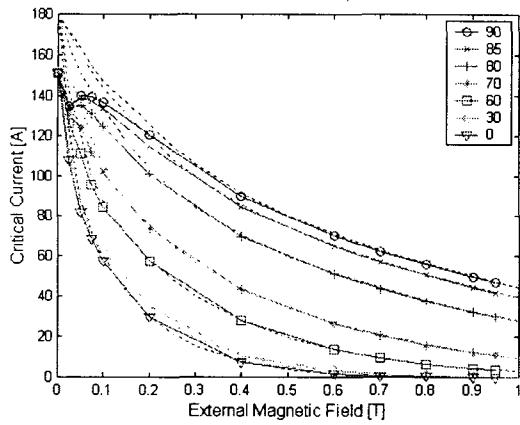


Fig. 7. Critical current vs. external magnetic field for a single tape. Dotted lines: measured data, solid lines: calculated data.

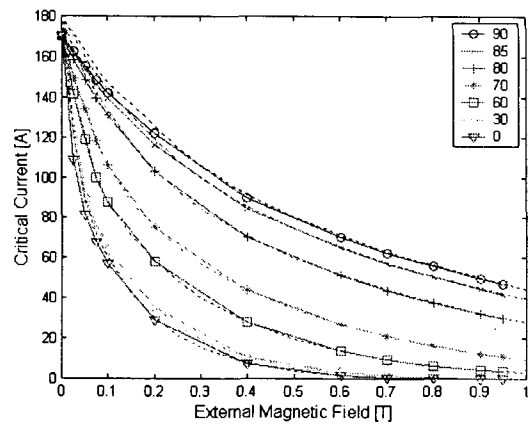


Fig. 9. Critical current vs. external magnetic field for the two tapes in which current flow in opposite directions. Dotted lines: measured data for a single tape not two, solid lines: calculated data.

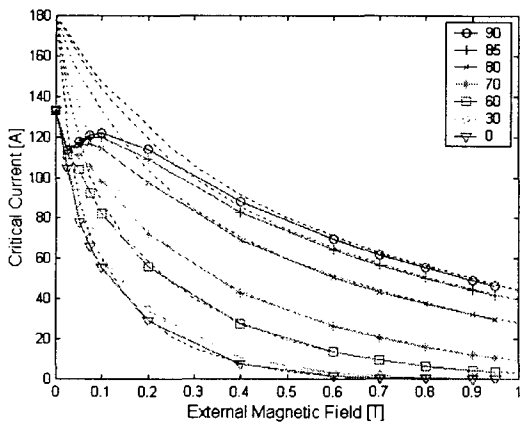


Fig. 8. Critical current vs. external magnetic field for the two tapes in which current flow in same directions. Dotted lines: measured data, solid lines: calculated data.

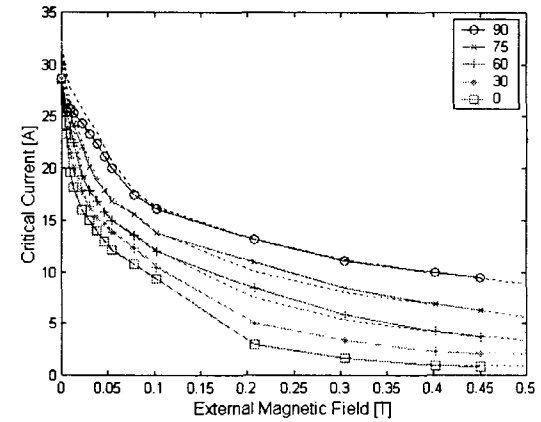


Fig. 10. Critical current vs. external magnetic field for a low  $I_c$  tape. Dotted lines: measured data, solid lines: calculated data.

### [참 고 문 헌]

- [1] Wansoo Nah, et al., Kang-Sik Ryu, and Jaimoo Yoo, "Optimum Reduction of Self Field Effects in a Bi-2223 Stacked Superconducting Bus Bar", IEEE Transactions on Applied Super-conductivity, Vol. 9, No. 2, pp. 960-963, June 1999.
- [2] Wansoo Nah, et al., "Load Line Analysis of Bi-2223 Tape-Stacked Cable for Self Field effects", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 10, No. 1, pp. 1158-1161, March 2000.