

외부자계 인가 시 적층 고온초전도선재의 임계전류 특성

이승욱, 박명진, 심정욱, 차귀수, 이지광\*  
 Soonchunhyang University, Woosuk University\*

Critical Current Characteristic of HTS Stacked Tapes in External Field

Seung-Wook Lee, Myungjin Park, Jungwook Sim, Gueesoo Cha, Ji-Kwang Lee\*  
 Soonchunhyang University, Woosuk University\*

**Abstract** - According to the improvement of the HTS wires performance, several types of HTS superconducting machines, such as, transformer, motors, current limiters, and transmission cables are being developed.

Degradation of the critical current in HTS tape owing to external field is very important subject in developing the HTS machines. Considering that stacked HTS tapes are widely used to develop the large HTS machines, the critical current characteristics of stacked HTS tapes in external field need to be examined.

In this paper, we present critical current characteristics of 4-stacked HTS tapes which are exposed to the external field. HTS tape with critical current of 4-stacked HTS tape. Test results prove that four times critical current of single HTS tape is smaller than critical current of stacked HTS tape in high external field.

지 않다. 모재는 은합금으로 제작되었으며, 외부자장이 없는 상태에의 임계전류는 68A이다. 그림 1은 고온초전도 선재의 단면을 보여준다.

표 1. 고온초전도 선재의 사양

항 목	특 성
테이프 두께	0.2 [mm]
테이프 폭	3.1 [mm]
재 질	Bi-2223
모 재	은합금
트위스트 유·무	무
임계 전류	68 [A]



그림 1. 고온초전도선재의 단면도

1. 서 론

고온초전도 선재가 발견된 이후 높은 임계온도와 임계전류밀도를 갖는 선재에 대한 연구가 활발히 진행되어왔다. 최근 77K에서 약 100A의 임계전류를 가지는 선재가 개발됨에 따라 송전케이블, 전류제한기, 변압기와 같은 전력용용 기기의 적용이 가속화되고 있다. 하지만 널리 알려진 것과 같이 고온초전도 선재의 임계전류는 자장에 대하여 큰 폭으로 감소하는 특징을 가지고 있다.

고온초전도 선재를 사용한 전력용 기기에서 자장에 의한 임계전류의 감소에 따른 통전 전류의 제한은 대용량 전력용용 기기의 설계 시 고려해야 할 사항이다.

대용량 전력기기에서는 대전류가 요구되고, 높은 전류를 통전 시키기 위한 방법으로 고온초전도 선재를 병렬로 적층한 선재를 사용하는 방법이 제시되고 있으므로 이에 대한 임계전류특성을 파악하는 것이 필요하다.

본 논문에서는 Bi-2223로 제작된 고온초전도선재 4가닥을 적층한 선재에 외부자계의 크기 및 방향에 따라 선재의 임계전류의 감소 영향을 살펴보고, 자계의 영향에 의한 적층고온초전도 선재의 임계전류영향을 보기 위해 초전도선 한 가닥을 사용한 단일 선재에서의  $I_c-B$  특성을 측정하여 4가닥 적층 선재의  $I_c-B$ 에 따른 임계전류특성치와 비교하였다.

2. 본 론

2.1 실험 장치 및 실험 방법

외부자계 인가 시 적층 고온초전도 선재의 임계전류특성을 알아보기 위하여 사용된 Bi-2223테이프에 대한 상세 사항은 표 1에 나타내었다. 초전도 선재의 폭과 두께는 3.2mm, 0.2mm이고 필라멘트는 트위스트 되어있

외부자계를 인가하기 위한 마그네트는 철심과 에나멜 동선을 사용하여 제작하였다. 초전도 테이프 시편이 위치하게되는 공극 부분은 약 52mm이고, 공극에서의 자계의 균일성을 알아보기 위해 시편이 위치할 공극의 중앙에서부터 25mm 간격으로 자계를 측정할 결과 시편이 위치하는 지점에서 자계의 차이는 4%로 임계전류에 큰 영향을 미칠 정도는 아니다.

그림 2는 마그네트의 코일 부에 흘려주는 전류에 대해 공극에서 발생한 평균자장의 크기를 측정할 결과이다.

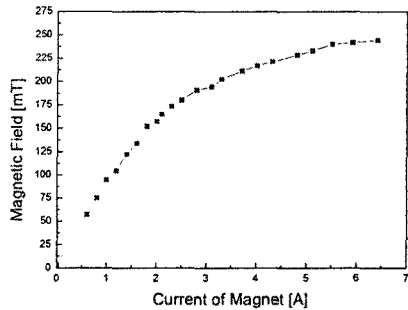


그림 2. 외부자계 인가용 마그네트의 공극 자장

적층된 초전도 선재의 임계전류를 비교하기 위해 한 가닥으로 이루어진 단일 고온초전도 선재에서의  $I_c-B$  특성을 측정하였다. 외부자계 인가용 마그네트의 공극 중앙 부분에 고온초전도 선재 시편을 위치시키고 외부자계를 선재의 넓은 면에 수평( $\theta=0^\circ$ )으로부터 수직( $\theta=90^\circ$ )까지  $10^\circ$  간격으로 자장인가방향을 바꾸어 임계전

류를 측정하였다. 선재의 임계전류 값의 판단은 널리 사용되고 있는  $1\mu\text{V}/\text{cm}$ 의 기준을 적용했고, 이 기준을 적용하여 측정된 결과를 그림 4에서 보여준다.

그림 3의 단일 고온초전도 선재의  $I_c-B$ 의 결과로부터  $\theta = 0^\circ \sim 40^\circ$ 에서 임계전류가 급격히 감소하는 것을 알 수 있으며 특히  $\theta = 20^\circ$  근처에서 임계전류의 감소가 가장 심하다는 것을 알 수 있다.

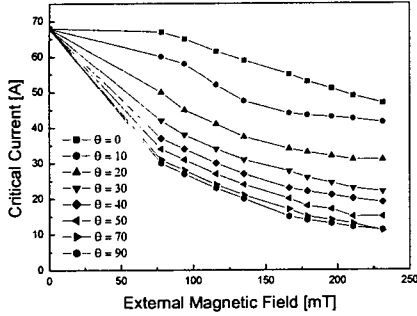


그림 3. 단일 고온초전도 선재의  $I_c-B$

### 2.2 적층 고온초전도 선재의 $I_c-B$ 특성

적층 고온초전도 선재의 임계전류특성을 시험하기 위해 표 1의 고온초전도 선재 4개를 적층하여  $170\text{mm} \times 30\text{mm} \times 5\text{mm}$ 인 판 양단에 전류리드를 장착시킨 후 4개의 고온초전도선재를 적층한 선재를 집합하였다. 그림 4는 적층 고온초전도 선재의 임계전류를 측정하기 위한 샘플이다. 그림 5는 적층 고온초전도 선재의  $I_c-B$  측정결과를 보여주며, 단일 고온초전도 선재의 경우와 마찬가지로 외부자장 인가용 마그네트의 공극의 중앙 부분에 위치시키고 외부자장을 선재의 넓은 면에 수평( $\theta = 0^\circ$ )으로부터 수직( $\theta = 90^\circ$ )까지  $10^\circ$  간격으로 자장인가 방향을 바꾸어 임계전류를 측정하였다. 적층 선재에서도 임계전류 값의 판단은  $1\mu\text{V}/\text{cm}$ 의 기준을 적용하여 측정하였다.

단일 고온초전도 선재의 결과와 유사하게 적층 선재에서도 외부자장의 방향이  $\theta = 20^\circ$  근처에서 임계전류가 급격히 감소하는 것을 알 수 있다.

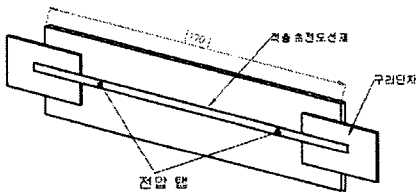


그림 4. 적층 초전도 선재의 임계전류측정 샘플

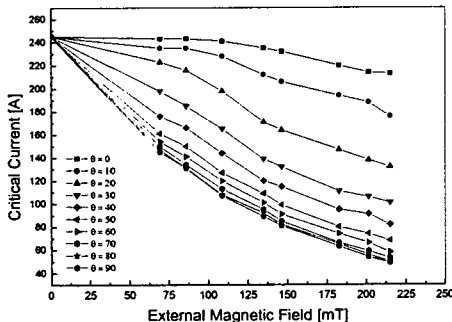


그림 5. 적층 고온초전도 선재의  $I_c-B$

### 2.3 단일 선재와 적층 선재의 $I_c-B$ 특성 비교

Bi-2223로 제작된 고온초전도선 4가닥을 적층한 선재의 임계전류영향을 보기 위한 방법으로 외부자장에 대한 단일 초전도 선재 임계전류를 단순히 4배한 값과 적층 선재의 외부자장에 따른 임계전류를 비교하였다.

그림 6은 외부자장이 가해지는 방향이 선재의 넓은 면에 수평( $\theta = 0^\circ$ )으로 인가될 때 임계전류의 측정값이다. 그림에서 외부자장의 세기가 130mT를 넘으면 단일 초전도 선재의 임계전류를 4배한 값이 적층 선재의 임계전류보다 큰 것을 알 수 있다.

그림 7은 외부자장이 선재의 넓은 면에 대하여  $\theta = 10^\circ$ 로 인가될 때 임계전류의 측정값이다. 이 그림에서도 외부 자장의 세기가 100mT 이상에서 단일 초전도 선재의 임계전류를 4배한 값보다 적층 선재의 임계전류가 확연하게 크다는 것을 알 수 있다. 이는 인접한 초전도선재에서 발생하는 자계의 영향 보다 적층선재 중 바깥쪽에 위치한 선재에서 자장을 차폐하는 영향이 크기 때문이다.

그림 8은 외부자장이 선재에  $\theta = 20^\circ$ 로 인가될 때의 측정값이다. 이때에는 전체 영역에서 적층선재의 임계전류가 단일 초전도 선재의 임계전류 값보다 큼을 알 수 있다.

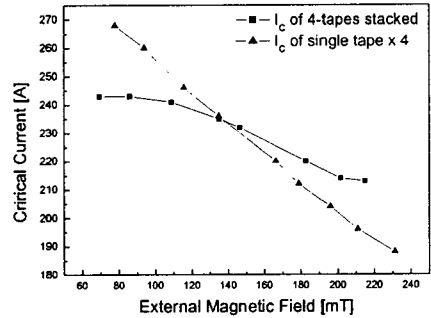


그림 6. 적층 선재와 단일선재의 임계전류 비교 ( $\theta = 0^\circ$ )

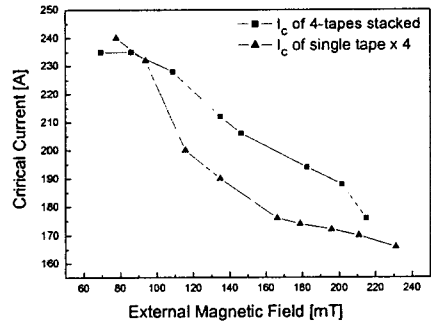


그림 7. 적층 선재와 단일선재의 임계전류 비교 ( $\theta = 10^\circ$ )

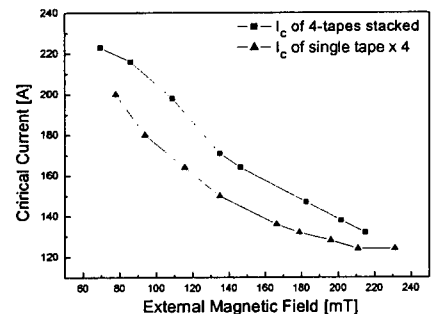


그림 8. 적층 선재와 단일선재의 임계전류 비교 ( $\theta = 20^\circ$ )

그림 9는 외부자장이 선재의 넓은 면에 대하여  $\theta = 30^\circ$ 로 인가될 때 임계전류의 측정값이다. 그림 8에서와 마찬가지로 단일 초전도 선재의 임계전류를 4배한 값보다 적층 선재의 임계전류가 크나 단일 선재와 적층 선재의 임계전류의 차이는 그림 8보다 작다는 것을 알 수 있다. 이는 적층 선재에서 외부자장 침투에 의한 임계전류 감소가 단일선재의 경우보다 더 크다는 것을 의미한다.

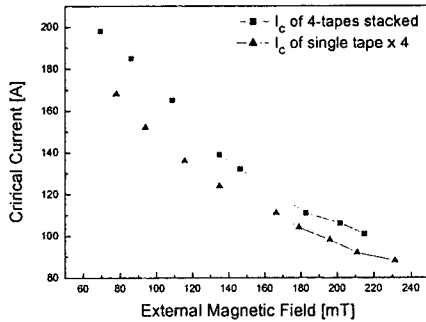


그림 9. 적층 선재와 단일선재의 임계전류 비교( $\theta = 30^\circ$ )

외부자장이 선재의 넓은 면에 대하여  $\theta = 40^\circ \sim 90^\circ$ 로 인가 시 임계전류의 측정값은 적층선재의 임계전류와 단일선재의 임계전류를 4배한 값과 점점 같아진다.

그림 10은 외부자장이 선재의 넓은 면에 대하여  $\theta = 90^\circ$ 로 인가될 때 임계전류의 측정값으로 그림 9보다 임계전류의 차이가 줄어들음을 알 수 있다. 외부에서 인가되는 자장의 각도가 클수록 적층 선재에 대한 자속침투가 증가되고, 단일선재에서 외부자장에 대한 임계전류를 4배한 값에 근접함을 확인하였다.

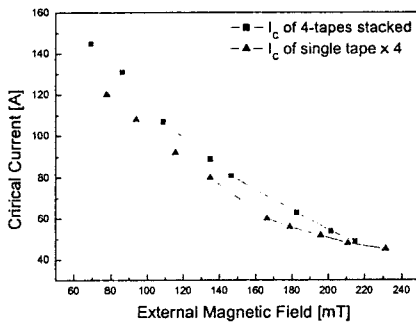


그림 10. 적층 선재와 단일선재의 임계전류 비교( $\theta = 90^\circ$ )

### 3. 결 론

고온초전도 선재를 사용한 전력용용 기기에서 자장에 의한 임계전류의 감소는 대전류가 요구되는 대용량 전력 기기의 설계에 많은 제약을 준다. 높은 전류를 통전시키기 위한 방법으로 고온초전도 선재를 병렬로 적층한 선재를 사용하는 방법이 제시되고 있다.

본 논문에서는 Bi-2223로 제작된 고온초전도선재 4가닥을 적층한 선재에 외부자장의 크기 및 방향에 따라 선재의 임계전류의 감소 영향을 살펴보고, 자기자계의 영향에 의한 적층고온초전도 선재의 임계전류영향을 보기 위해 초전도 선 한 가닥을 사용한 단일 선재에서의  $I_c - B$ 특성을 사용하여 4가닥 적층 선재의  $I_c - B$ 에 따른 임계전류와 비교하였다.

실험 결과 외부자장이 적층고온초전도 선재에 적게 인가될 경우 단일 선재 임계전류의 4배한 값이 적층 선재보다 클 수 있으며, 외부자장이 적층고온초전도 선재에 많이 인가되었을 경우에는 적층 선재가 단일 선재 임계전류의 4배 값보다 클 수 확인할 수 있었다. 따라서 적층선재의 임계전류는 단일 선재의 임계전류에 적층 개수에 따른 곱이 아님을 알 수 있다.

전력기기에서 초전도 적층 선재를 사용할 때 자기자계에 의한 임계전류의 감소 영향보다 외부자장에 대한 차폐 효과가 크다는 것을 알 수 있으며, 이는 고온초전도 선재의 약점인 자장에 의한 임계전류의 감소를 보완할 수 있는 방법으로 생각된다.

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

### [참 고 문 헌]

- [1] Manfred Daumling, "Spatial Distribution of Transport Current in Low and Self Field in BSCCO Tapes", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 7, No. 2, pp. 1335-1338, June 1997.
- [1] C.P. Bean, "Magnetization of Hard Superconductor," Physical Review Letters, Vol.8, No.6, pp.250-253, 1962
- [3] M. Wilson, Superconducting magnet, Clarendon Press, New York, 1983
- [4] J.R.T. Lehtonen et al., "AC Losses in Magnets Wound of HTS Tape Conductors", Advances in Cryogenic Engineering, Vol.46, pp. 839-846, 2000