

굽힘모드에 따른 Ag 시스 Bi-2223 초전도장척 테이프의 굽힘 변형률 특성

Strain characteristics of Ag sheathed Bi-2223 superconducting tapes according to bending mode

신형섭*, 최수용**, 고동균**, 하홍수***, 하동우***, 오상수***

H.S. Shin, S.Y. Choi, D.K. Ko, H.S. Ha, D.W. Ha, S.S. Oh

Abstract

Influences of bending strain on the critical current (I_c) in Ag-sheathed Bi-2223 superconducting tapes at 77K were investigated. The effect of bending mode on the bending strain characteristics was discussed in viewpoints of sample geometry, n -value and damage morphology. Especially, in this paper, we reported the I_c behavior in Ag alloy sheathed Bi-2223 multifilamentary superconducting tapes under hard bending. As a result, I_c degradation behavior of the hard bending appeared remarkably than the case of easy bending, but it did not influence greatly on the n -value.

Key Words : Bi-2223 multifilamentary tape, bending mode, strain effect, critical current, n -value

1. 서론

산화물계 고온초전도선재의 제작기술과 냉동공학의 급속한 발전으로 이러한 고온초전도선재의 고자장 마그네트로의 사용기대가 높아지고 있다. 이러한 초전도선재의 마그네트 적용시, 선재는 여러가지 형태의 응력 및 변형률을 받게 된다[1]. 그 예로서는, 전자력에 의한 와인딩부의 후프응력(인장변형률), 열처리조건 및 냉각시 열수축률차에 의한 압축변형률, 그리고 와인딩 과정에서 발생하는 굽힘변형률을 들 수가 있다. 그 중에서도 굽힘변형에는 기존부터 주로 연구되어 오던 선재의 두께방향 굽힘(이하 easy bending이라 정의)과 선재의

폭방향 굽힘(이하 hard bending이라 정의)이 있다 [2]. 특히, 초전도테이프를 코일이나 케이블상태로 응용시, 선재는 두께방향 굽힘뿐만 아니라 폭 방향 굽힘을 받게 된다[3,4]. 따라서 본 연구에서는 다심 필라멘트를 갖는 서로 다른 세 종류의 Ag alloy Bi-2223초전도테이프의 장척 선재를 사용하여, 임계전류에 미치는 굽힘변형률의 영향에 대하여 조사하였다. 선재의 폭방향과 두께방향의 굽힘모드에 따른 영향을 비교 검토하였다. 이러한 연구결과는 고온초전도선재를 고자장 마그네트 및 전력 응용 기기에 적용시 시스템설계 및 제작을 위한 중요한 기초 데이터를 제공하게 된다.

2. 실험 방법

2.1 시료

본 실험에서 사용된 세 종류의 다심 Bi-2223초전도테이프는 산화물 복합 초전도체의 기계적 특성 평가를 위한 시험법 확립을 위하여, VAMAS/TWA 16-Subgroup에서 국제라운드로빈시험(Round Robin Test, RRT)용으로 제공된 표준시료이다.

* 안동대학교 기계공학부
(경북 안동시 송천동 388)
Tel : 054-820-5675

E-mail : hsshin@andong.ac.kr

** 안동대학교 대학원 기계공학과

*** 한국전기연구원 초전도응용연구팀

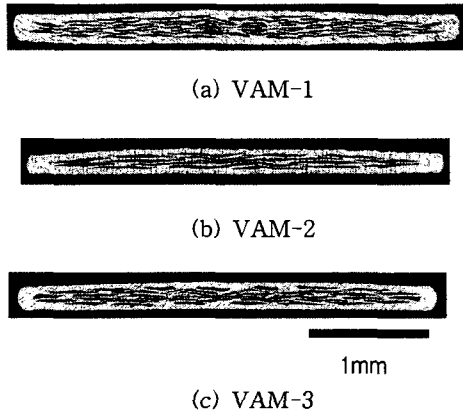


그림 1. Bi-2223 초전도테이프의 단면.
 Fig. 1. Cross-sectional view of Bi-2223 superconducting tapes.

표 1. 시험에 사용된 시료의 특성치.
 Table 1. Specifications of samples tested.

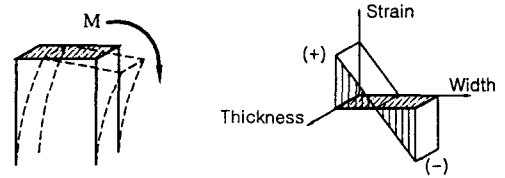
Sample	Dimension width x thick (mm ²)	Critical current at 77K, SF (A)	Sheath	Filament No.
VAM-1	3.7 x 0.27	48	Ag/Ag alloy	57
VAM-2	2.95 x 0.182	28	Ag alloy	19
VAM-3	3.14 x 0.254	38	Ag alloy	37

Fig.1은 본 시험에 사용된 초전도테이프의 각 단면을 나타내고 있다. 이들의 기본적인 특성치를 Table 1에 나타내었다[5].

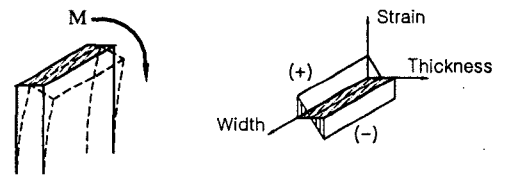
2.2 굽힘실험

Bi-2223테이프의 hard bending 시험법은 기존의 두께방향 굽힘, 즉 easy bending과는 달리, 테이프의 폭 방향 굽힘을 가하는 것이다. Fig. 2는 굽힘 모드에 따라 테이프 단면내에 발생하는 변형률분포를 나타낸 것이다. Bi-2223테이프의 굽힘 실험에는 G10재로 제작한 다른 곡률반경을 갖는 시료홀더를 사용하였다. 굽힘모드에 따른 시료홀더와 시료의 치부과정에 대한 모식도를 Fig. 3에 나타내었

다. 그리고 시료에 가해진 변형률을 얻기 위해, 각 굽힘모드에 따른 시료홀더의 곡률반경을 Table 2에 나타내었다. 이때, 발생한 변형률은 시료의 중립축으로부터 단부까지의 거리에 비례하므로, 최대 변형률은 식(1)과 같이 주어진다. 여기서, 동일한 공칭응력을 얻기 위해서는 easy bending의 경우가 hard bending의 경우보다 훨씬 곡률이 큰 시료홀더를 사용하여야 한다는 것을 알 수 있다.



(a) For hard bending



(b) For easy bending

그림 2. 굽힘모드와 테이프 단면내의 변형률 분포.
 Fig. 2. Bending mode and corresponding strain distribution in cross-section of tape.

표 2. 시료홀더의 굽힘반경.

Table 2. Bending radius of sample holder.

Nominal strain(%)	Bending radius of sample holder, r(mm)	
	hard bending	easy bending
0	∞	∞
0.2	998	67.5
0.4	498	34
0.5	398	-
0.6	331	22.5
0.8	248	16.5
1.0	198	13.5

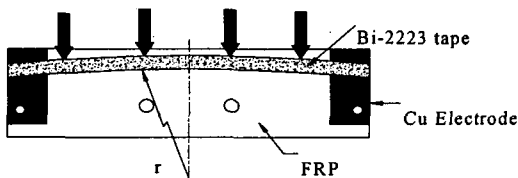
$$\varepsilon = \frac{w}{2r + w} \times 100(\%) \quad (\text{for hard bending}) \quad (1)$$

$$\varepsilon = \frac{t}{2r + t} \times 100(\%) \quad (\text{for easy bending})$$

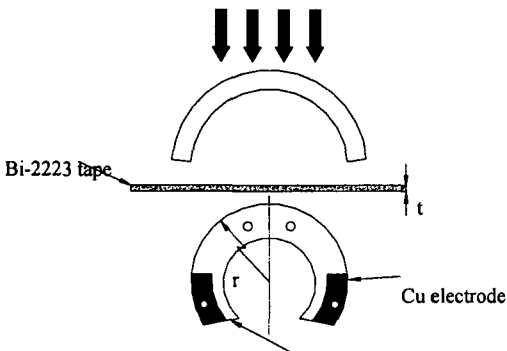
여기서, r 은 시료홀더의 반경, w 와 t 는 Bi-2223테이프의 폭과 두께를 나타낸다.

HTS선재의 hard bending의 경우 $w/t \approx 10$ 가 커서 시험홀더에 시료를 치부할 때 각별한 주의가 요구된다. 따라서 굽힘 변형률이 증가함에 따라서 시료홀더에 부착시 예상되는 시료의 폭방향 압축부에서 발생하는 좌굴을 방지하기 위하여, 시료의 좌단을 먼저 고정된 후 원통형 목재롤러를 사용하여 홀더를 회전시켜 가면서 시료를 홀더에 접촉시켜 납땜 부착하였다.

한편, Easy bending의 경우에는 Fig. 3 (b)에 보인바와 같이 상부홀더커버로 시료를 가볍게 눌러



(a) For hard bending



(b) For easy bending

그림 3. Bi-2223테이프의 폭방향 굽힘 및 두께방향 굽힘을 위한 시료홀더의 모식도와 시료치구 과정. Fig. 3 Schematics of sample holders for hard and easy bending tests of Bi-2223 tape and sample holding procedure.

굽힘변형을 가한 상태에서 좌단으로부터 시료를 부착하여 추가적인 손상발생을 억제하고자 하였다.

Bi-2223테이프의 I_c 측정은 단일시험편을 사용하여 수행하였다. 시료의 게이지 길이는 60mm, 그 중앙부에 30mm 간격의 전압단자를 설치하였다. I_c 값은 4단자법을 사용하여 $1 \mu V/cm$ 전기장 기준으로 측정하였다. 이때, 발생하는 전압 V 는 초전도상태에서 상전도 상태로의 천이구간에서 측정하였다.

전압-전류곡선의 상승부분에서 통상 전압은 전류의 I 의 함수로, 식 (2)의 관계와 같이 근사하여 나타낼 수 있다.

$$V = cI^n \quad (2)$$

여기서, V 는 발생전압, I 는 부가전류, 그리고 c 는 비례상수를 나타낸다. 변형을 변화에 따른 n 값은 $0.2 \sim 5 \mu V/cm$ 영역에서 $\log V$ 와 $\log I$ 사이의 직선 구간 선형 피팅으로 구하였다. 이렇게 구한 n -값의 거동은 테이프 선재에 균열진전에 대한 간접적인 추정을 가능하게 한다. n 값이 클수록, 초전도에서 상전도로의 천이가 야-프하여 전류의 분류 등이 적은 양호한 선재라 할 수 있다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 4는 Bi-2223 초전도테이프의 굽힘시험을 통해 얻어진 $I_c/I_{c0} - \varepsilon$ 관계를 나타낸 것이다. 각 굽힘 변형률 조건에서 얻어진 I_c 는 77K, $\varepsilon=0\%$ 인 경우의 임계전류 I_{c0} 로 나누어서 무차원화하여 나타내었다. 시험에 사용된 Bi-2223테이프의 I_{c0} 값은 Table 1과 같이 측정되었다. Hard bending과 easy bending시험의 경우, 모두 굽힘변형률이 증가함에 따라 임계전류는 저하하는 거동을 나타내었다. 특히, Hard bending의 경우, VAM-1은 변형률이 증가함에 따라 다소 급격한 I_c 의 저하를 나타내었고, VAM-2와 VAM-3은 약 0.2%의 변형률에서부터 I_c 저하가 발생하였다. Easy bending의 경우에도 임계전류밀도가 높은 VAM-1선재가 VAM-2와 VAM-3선재보다 현저한 I_c 의 저하를 나타내었다. 이것으로부터, 임계전류가 높은 선재일수록 hard bending과 easy bending시 굽힘변형에 따른 임계전류가 취약한 것으로 생각된다. 한편 각 변형률에 있어서, 부가한 변형률을 제거한 후에도 I_c 값의 회복은 일어나지 않았다. 동일한 굽힘변형률에서, hard bending의 경우가 easy bending의 경우보다 낮은 임계전류를 나타내, 임계전류의 열화가 훨씬 크게

일어났다는 것을 알 수 있다. 이때, $I_c/I_{c0}=0.9$ 를 기준으로 한 비가역 변형률 ϵ_{irr} 를 정의하면, easy bending에 대해서는 테이프재 종류에 관계없이 $\epsilon_{irr} = 0.38\% \sim 0.55\%$ 인데 반하여, hard bending에서는 $\epsilon_{irr} = 0.2\% \sim 0.25\%$ 로 낮은 임계변형률값을 나타냄을 알 수 있다. 따라서, Bi-2223테이프에서 선재의 가역 굽힘변형률범위는 선재의 굽힘방향에 따라 차가 존재하는 것을 알 수 있다. 이것은 단면

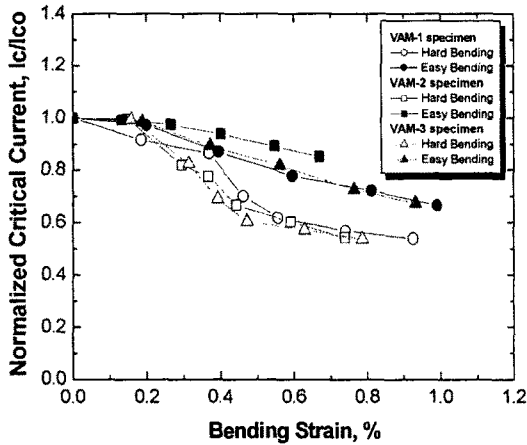


그림 4. Bi-2223테이프의 폭방향 및 두께방향 굽힘에 의한 $I_c/I_{c0} - \epsilon$ 관계 (at 77K).

Fig. 4 $I_c/I_{c0} - \epsilon$ relation during hard and easy bending in Bi-2223 tapes (at 77K).

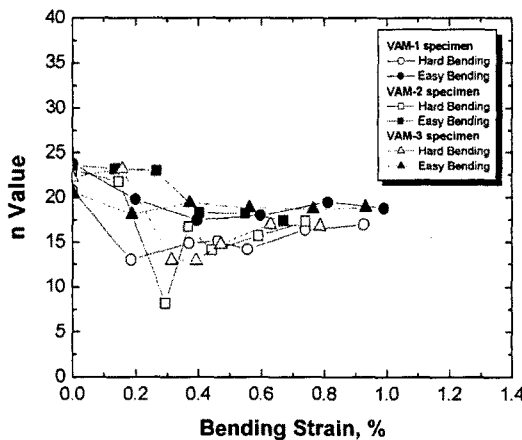


그림 5. 폭방향 및 두께방향 굽힘에서 n값과 굽힘 변형률의 관계

Fig. 5 Relation between n value and bending strain for hard and easy bending.

내 초전도 필라멘트의 분포형상에 따른 차와 hard bending시의 큰 형상비로 인해 굽힘변형시 압축부에서 국부적인 미소 좌굴손상(local bucklings) 등에 기인하였다고 생각된다.

I_c 저하의 또 다른 원인으로는 변형률 변화에 따른 시료홀더의 교체로 인하여 thermal cycling에 의한 기계적 손상누적이 부가적인 I_c 의 저하를 초래하게 된다. 따라서 연속적인 기계적 변형을 부가하면서 I_c 측정이 가능한 새로운 굽힘 변형장치의 개발이 요구된다[2].

Fig. 5는 굽힘 변형률의 증가에 따른 n 값의 변화를 나타낸 것이다. n값은 hard bending과 easy bending 모두, 전체적으로 변형률이 증가함에 따라 다소의 분산을 나타내지만 서서히 감소하는 거동을 나타내었고, $\epsilon=0.4\%$ 이상에서는 거의 일정한 값을 나타내었다. 또한 동일한 변형률 값에서는 Hard bending의 경우가 Easy bending인 경우보다 다소 낮은 값을 나타내었다. 이것은 Fig. 4에 보인 $I_c - \epsilon$ 의 거동과도 어느정도 대응하고 있다. 굽힘 변형률의 증가에 따른 n값의 거동은, 균열이 한 곳에서 발생하여 변형률이 증가하면 집중 응력에 의해서 단락을 가져오는 인장시험의 경우에서의 n값의 거동과는 근본적으로 다른 거동이다[6]. 즉, Bi-2223 테이프의 초전도체에 굽힘변형률에 의한 국부적인 균열 발생은 Ag 시-스부로 전류분류를 작게 하고 이에 따른 임계전류의 완만한 저하가 n값의 이러한 변화를 가져왔다고 생각된다. 향후 이를 확인하기 위한 필라멘트부 손상관찰을 통한 연구가 필요하다.

4. 결론

(1) Ag합금/Bi-2223 초전도 다심 테이프의 임계전류는 hard bending 및 easy bending 시 변형률의 증가와 더불어 낮은 굽힘변형률에서부터 서서히 저하하는 거동을 나타낸다.

(2) 동일한 공칭변형률에서 hard bending의 경우가 easy bending시 보다 I_c 저하가 현저하였다.

(3) 변형률증가에 따른 n 값의 저하는 hard와 easy bending시 모두 다소의 저하를 가져왔고, 임계전류-변형률 거동과 유사하였다.

(4) Bi-2223테이프의 임계전류특성에 미치는 굽힘변형률의 영향은 임계전류가 높은 선재일수록 굽힘변형률에 다소 크게 영향을 받는 것으로 나타났다.

감사의 글

본 연구는 21세기프론티어 연구개발사업인 차세대 초전도응용기술개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었다. VAMAS RRT를 위해 시료를 제공해준 NIMS의 Dr. Kuroda에게 감사 드립니다.

참고 문헌

- [1] K. Osamura, M. Sugano, T. Wada and S. Ochiai, Mechanical properties of Ag/Bi2223 composite superconductors, *Adv. Cryo. Eng. Materials*, Vol. 46, pp. 639-645 (2000).
- [2] W. Goldacker, S. I. Schlachter, R. Nast et al. Bending strain investigations on BSCCO(2223)tapes at 77K applying a new bending technique. *Proc. Int. Workshop on Mechano-electromagnetic property of composite superconductors*, pp. 21-25 (2001).
- [3] J. X. Jin, S. X. Dou, H. K. Liu, T. Hardono, C. Cook and C. Grantham, Critical current degradation caused by winding process of Bi-2223/Ag HTS wire in the form of a coil, *IEEE Trans. Applied Super. Vol, No. 9* pp.138-141 (2001).
- [4] P. Skov-Harsen, Z. Han and J. I. Bech, stresses and strains in multi-filament HTS tapes, *IEEE trans. Applied super. Vol, No.2* pp.2617-2620 (1999).
- [5] 신형섭, 최수용. Bi-2212 산화물 복합 초전도 테이프의 기계적 특성 평가, 한국초전도 저온 공학회논문집. 3권 2호. pp.1-4 (2001).
- [6] 신형섭, K. Katagiri. Bi-2223 초전도테이프에서 임계전류의 응력/변형률 특성에 미치는 외부 강화의 영향. 한국초전도 저온공학회논문집. 3 권 1호. pp.6-10 (2001).