

# Hard bending시 Bi-2223 초전도테이프의 임계전류 열화 거동

신형섭\*, 최수용\*\*, 고동균\*\*, 하홍수\*\*\*, 하동우\*\*\*, 오상수\*\*\*  
\* 안동대학교, \*\* 안동대학교 대학원, \*\*\*한국전기연구원 초전도응용연구팀

## The $I_c$ degradation behavior in Bi-2223 superconducting tapes during hard bending

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

\* Andong National University, \*\* Andong National University, Graduate School,

\*\*\*Korea Electrotechnology Research Institute

E-mail: [hsshin@andong.ac.kr](mailto:hsshin@andong.ac.kr)

**Abstract** - Influences of bending strain on the critical current ( $I_c$ ) were investigated in Bi-2223 superconducting tapes at 77K. The effect of bending mode on the  $I_c$  degradation behavior was discussed in viewpoints of test method,  $n$ -value and damage morphology. Especially, in this paper, we reported the  $I_c$  behavior in Ag alloy/Bi-2223 multifilamentary superconducting tapes under bending occurred within width x length plane of the tape which was called as a hard bending.

### 1. 서 론

Bi-기 산화물 초전도체의 제작기술과 냉각공학의 급속한 발전은 고자장 마그네트에 HTS선재 사용의 기대를 높여 오고 있다. 이러한 초전도체를 마그네트에 적용하게 되면 여러 가지 형태의 응력 또는 변형률을 받게 된다[1]. 그 예로, 와인딩부에서 후프응력(인장변형률), 냉각시 열수축률 차에 따른 압축변형률, 그리고 선재의 와인딩 과정에서 발생하는 굽힘 변형 등을 들 수가 있다. 특히, 와인딩 과정에서 초전도테이프는 폭방향을 회전축으로 한 굽힘변형을 받아, 지금까지 그에 따른 임계전류의 저하에 미치는 굽힘변형률 효과에 관한 연구가 주로 진행되어 오고 있다[2, 3]. 그러나, 코일이나 케이블과 같은 응용분야에서는, 굽힘이나 인장 외에 비틀림 변형을 받게 된다[4,5]. 비틀림 조건하에서 HTS테이프는 두께방향을 회전축으로 한 굽힘 변형 상태에 놓이게 되므로, 기존에 수행 되어온 임계전류에 미치는 변형률효과(이하 Easy bending이라 부름)조사와 더불어 두께방향을 축으로한 굽힘변형(이하 Hard bending이라 부름)이 HTS의 임계전류의 저하에 미치는 영향에 대한 연구 또한 필요하다.

따라서 본 연구에서는 Bi-2223초전도 테이프 선재의 임계전류에 미치는 굽힘변형률 효과를 조사하여, 굽힘 모드에 따른 영향을 비교 검토하였

다. 이러한 연구결과는 HTS테이프의 고자장 마그네트 및 전력 응용기기에서의 적용시 시스템설계 및 제작을 위한 중요한 데이터를 제공한다.

### 2. 실험 방법

#### 2.1 시험편

본 연구에서 사용한 고온초전도테이프는 한국전기연구원(KERI)에서 PIT방법으로 제작한 Ag 합금/Bi-2223 다심 선재로, 37개의 필라멘트로 구성되어 있다. Fig. 1은 Bi-2223테이프의 단면을 나타낸 것이며, Table 1은 실험에 사용된 초전도테이프의 특성치를 나타낸 값이다.

#### 2.2 굽힘 실험

Bi-2223 테이프의 Hard bending시험법은 기존의 테이프 폭 방향을 회전축으로 한 테이프의 두께방향 굽힘(thickness-wise bending), 즉 Easy bending의 경우와는 달리, 테이프의 두께 방향을 축으로 하여 단면의 폭방향 굽힘(width-wise bending)을 가하는 것이다.



Fig. 1. Cross-sectional view of Bi-2223 superconducting tape.

Table. 1. Properties of superconducting tape.

Sample	Sample size (mm)	Filament No.	$I_c$ at 77K S.F [A]
Bi-2223/Ag alloy	*3.7 x '0.3	37	34

Fig. 2는 굽힘 양상과 그에 따라 발생한 테이프 단면내의 변형률 분포를 나타낸 것이다.

Bi-2223테이프의 굽힘 실험에는 G10재로 제작한 다른 곡률반경을 갖는 시료홀더를 사용하였다. 각 굽힘 양식에서 시료홀더의 모식도를

Fig. 3에 나타내고 있다. 시료에 가해진 변형률을 얻기 위해 각 굽힘 양식에서 시료홀더의 곡률반경이 Table 2에 주어졌다. 이때 발생한 변형률은 중립축으로부터 단부까지의 거리에 비례하므로, 최대변형률은 식(1)과 같이 주어진다. 동일한 공칭응력을 얻기 위하여 Easy bending의 경우 훨씬 곡률이 큰 시료홀더를 사용하여야 한다는 것을 알 수 있다. 이때, 시료에 발생하는 최대 굽힘변형률은 다음과 같이 주어진다.

(for hard bending)

(1)

(for easy bending)

여기서,  $r$ 는 시료홀더의 반경,  $w$ 와  $t$ 는 Bi-2223 테이프의 폭과 두께를 나타낸다. Fig. 4는 굽힘시험에 사용된 시료 홀더의 사진을 나타낸다.

HTS선재의 경우,  $I_c$ 측정을 위해 시험홀더에 시료 치부시 주의가 요구된다. 특히 Hard bending의 경우  $w/t=10$ 의 커서, 굽힘 변형률이 증가함에 따라서 시료홀더에 부착시 예상되는 좌굴을 방지하기 위하여, 시료의 좌단을 먼저 고정 한 후 원통형 목재롤러를 사용하여 홀더를 회전시켜 가면서 시료를 홀더에 접촉시켜 납땜 부착하였다.

한편, Easy bending의 경우에는 Fig.4 (b)에 보인바와 같이 상부홀더커버로 시료를 가볍게 눌러 굽힘변형을 가한 상태에서 좌단으로부터 시료를

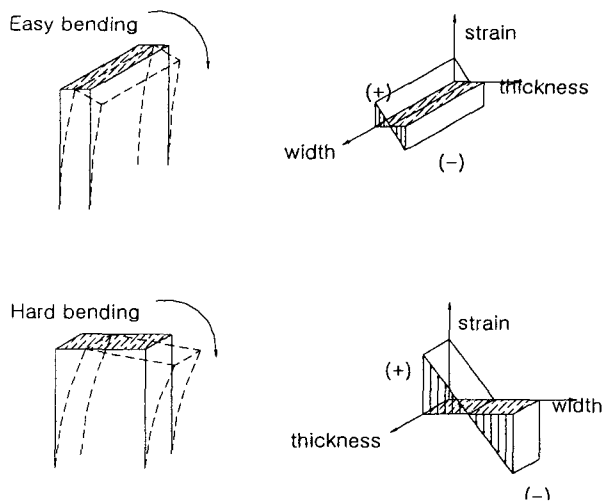


Fig. 2. Bending mode and corresponding strain distribution in cross-section of HTS tape.

Table. 2. Bending radius of sample holder

Nominal strain (%)	Bending radius of 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

부하여 부가적인 손상발생을 억제하고자 하였다.

Bi-2223테이프의  $I_c$  측정은 두 가지 방법으로 수행하였다. (1) 단일 시험편을 홀더에 연속적으로 부착하여 변형률을 증가시키면서 각 단계에서  $I_c$ 를 측정하는 단일시험편(single specimen)법과 (2) 각 변형률 홀더마다 처녀재를 사용한 복수시험편(multiple specimen)법이 있다. 시료의 게이지길이는 70mm, 그 중앙부에 30mm 간격의 전압단자를 설치하였다.  $I_c$ 값은 4단자법을 사용하여 1 /cm전기장 기준으로 측정하였다. 이때, 발생하는 전압  $V$ 는 초전도상태에서 상전도 상태로의 천이구간에서 측정하였다. 통상 전압은 전류의  $I$ 의 함수로 나타내, 식(2)의 관계를 나타낸다.

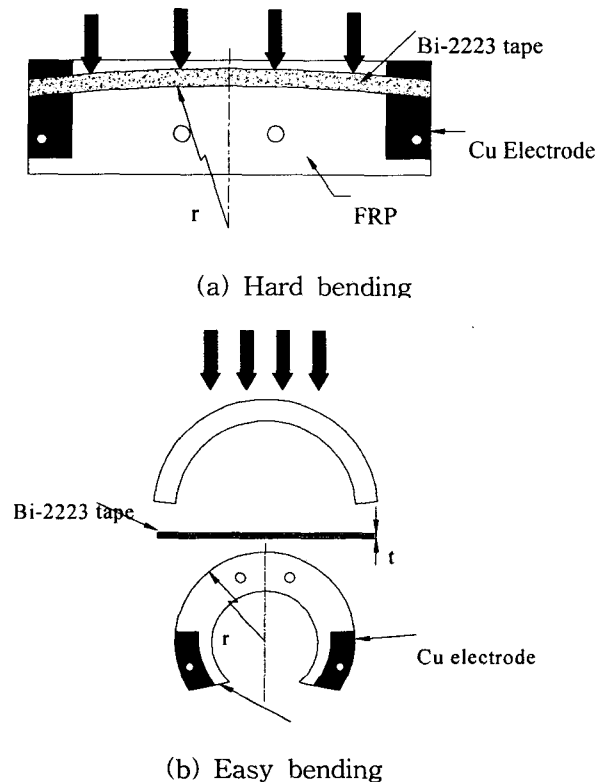
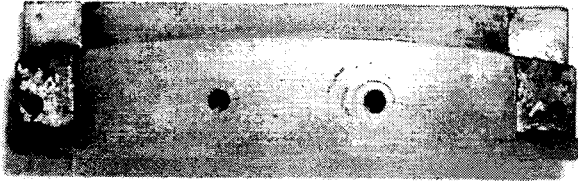
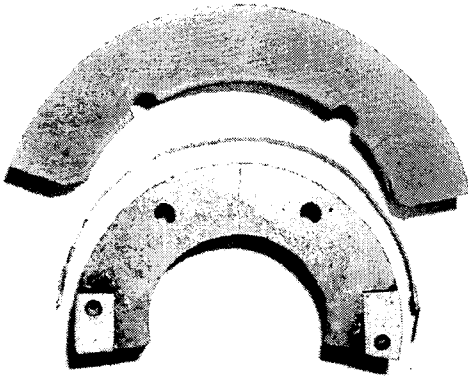


Fig. 3. Schematics of sample holders for hard and easy bending tests of Bi-2223 tape.



(a) For hard bending



(b) For easy bending

Fig. 4. Appearance of used in bending test of Bi-2223 tape.

(2)

여기서,  $V$ 는 발생전압,  $I$ 는 부가전류, 그리고  $c$ 는 상수 값을 나타낸다. 변형률 변화에 따른  $n$ 값은  $0.2 \sim 5$  /cm영역에서  $\log V$ 와  $\log I$ 사이의 직선구간 선형 피팅으로 구하였다. 이렇게 구한  $n$ -값의 거동은 테이프 선재에 균열진전에 대한 간접적인 추정을 가능케 한다.

$I_c$  측정 후, 초전도테이프에 발생한 손상양상을 관찰하기 위해 암모니아( $NH_4OH$ ), 과산화수소( $H_2O_2$ ), 그리고 물( $H_2O$ )의 체적비를 24 : 24 : 1로 혼합한 에칭액을 사용하여, 은(Ag)시-스재를 벗겨낸 다음, 금속광학현미경과 주사현미경(SEM)을 사용하여 초전도 필라멘트에 균열발생 및 양상을 관찰하였다.

### 3. 실험 결과 및 고찰

Fig. 5는 Bi-2223 초전도테이프의 굽힘시험을 통해 얻어진  $I_c/I_{c0} - \epsilon$  관계를 나타낸 것이다. 각 굽힘 변형률 조건에서 얻어진  $I_c$ 는 77K,  $\epsilon = 0\%$ 인 경우의 임계전류  $I_{c0}$ 로 나누어서 무차원화하여 나타내었다. 시험에 사용된 Bi-2223테이프의  $I_{c0}$ 값은 32~34A의 범위를 나타내었다. Hard bending과 Easy bending시험의 경우, 모두 굽힘변형률이 증가함에 따라 임계전류는 저

하하는 거동을 나타내었다. 특히, Hard bending의 경우는 0.2%에서부터  $I_c$ 의 저하를 초래하는 것을 볼 수 있다.

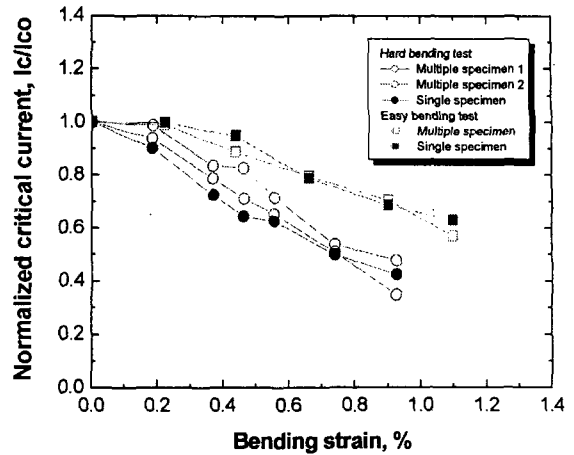


Fig. 5.  $I_c/I_{c0} - \epsilon$  relation during hard and easy bending in Bi-2223 tapes at 77K.

이것은 0.3%~0.4% 까지 거의  $I_c$ 저하를 나타내지 않는 인장변형률하의 거동과는 다르다는 것을 알 수 있다[2]. 한편 0.2%에서도 부가한 변형률을 제거한 후에도  $I_c$  값의 회복은 일어나지 않았다.

동일한 굽힘변형률에서, Hard bending의 경우가 Easy bending의 경우보다 낮은 임계전류를 나타내, 임계전류의 열화가 더 크게 일어났다는 것을 알 수 있다. 이때,  $I_c/I_{c0} = 0.9$ 을 기준한 비가역 변형률  $\epsilon_{irr}$ 를 정의하면, Easy bending에 대해서는  $\epsilon_{irr} = 0.43\%$ 인데 반하여, Hard bending에서는  $\epsilon_{irr} = 0.2\% \sim 0.25\%$ 임을 알 수 있다. 따라서, Bi-2223테이프에서 선재의 가역 변형률범위는 선재의 굽힘 방향에 따라 차로 나타내었다. 이것은 단면내 초전도필라멘트의 분포형상에 따른 차와 Hard bending 시의 큰 형상비로 인해 굽힘시 예상되는 좌굴손상 등에 기인하였다고 생각된다.

한편, 시험방법에 따른 차를 조사하기 위해, 단일시험편과 복수시험편을 사용하여 시험한 경우, 임계전류값의 저하거동에 미치는 영향을 비교하였다. Easy bending의 경우는 큰 차이 없이 거의 동일한  $I_c$ 저하를 나타내나, Hard bending의 경우는 단일시험편법의 경우가 복수 시험편법의 경우보다 다소 낮은  $I_c$ 를 나타냈다. 이러한 Hard bending시 임계전류 저하의 원인으로서는 single specimen법의 경우 연속적으로 변형률을 증가시키기 위해 각 holder를 교체하여 수행하는 동안 발생한 thermal cycling에 의한 손상, 이때 굽힘에 의한 부가적인 기계적 손상에 기인한 것으로 생각된다. 따라서, 단일시험편 사용시에도 언급한 손상누적 없이 연속적인 곡률변화가 가능한 새로운 굽힘변형 장치의 개발이 절실히 요구된다[2].

Fig.6은 Bi-2223테이프에 Hard bending시

본 실험에서 사용한 GFRP제 시료홀더와는 다른 U-형 밴딩 홀더로 실험했을 경우의  $I_c$  저하거동을 비교하여 나타낸 것이다. 이때, 시료는 황동제 U형 홀더에 납땜으로 부착되었다.  $I_c/I_{c0}=0.9$ 에서 정의한 비가역 변형률,  $\epsilon_{irr}=0.25$  (ANU),  $\epsilon_{irr}=0.6$  (KERI)로 U형 홀더를 사용한 경우 약 0.4%정도

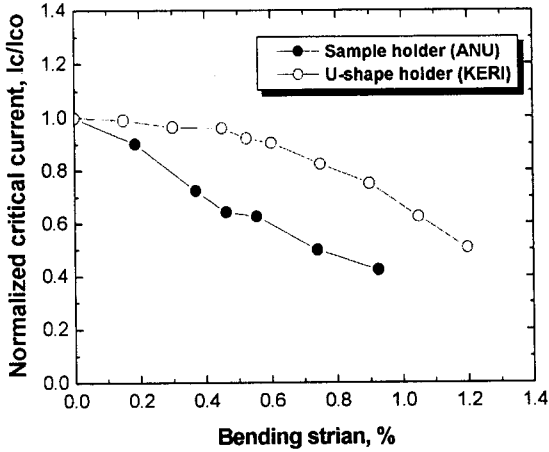


Fig. 6. Comparison of  $I_c/I_{c0}$ - $\epsilon$  during hard bending in Bi-2223 tapes.

큰 허용변형률을 나타내고 있다. 이러한 변형률한도의 차이는 먼저 황동제 홀더와 시료의 납땜 후 77K 저온까지 냉각시 열팽창계수의 차에 의해 시료에 발생하는 pre-strain은 큰 압축변형률을 나타내[3], 이것이 U형 홀더를 사용한 경우 허용 변형률 값을 증가시켰고[3], 또한 변형률 값을 달리한 일련의 시료 홀더를 사용한 경우는, 연속적인 굽힘변형률의 변화가 가능한 U형 홀더와는 달리, holder를 교체시 시험편에 가해지는 thermal cycling에 의한 손상누적에 의한 임계전류값의 저하로 영향을 미쳤다고 생각된다.

일반적으로 n 값은 초전도선재에 손상 등의 발생에 의해서 일어나는 전류의 분류거동 등을 나타낸다. I-V 특성곡선으로부터 식(2)을 사용하여 천이영역에서 n 값을 구하였다. Fig. 7은 굽힘변형률의 증가에 따른 n 값의 변화를 나타낸 것이다. n 값은 Hard bending과 Easy bending인 경우 모두, 전체적으로 변형률이 증가함에 따라 다소의 분산을 나타내지만 서서히 감소하는 거동을 나타내었다. 또한 동일한 변형률 값에서도 Hard bending의 경우가 Easy bending인 경우보다 다소 낮은 값을 나타내었다. 이것은 Fig. 5에 보인  $I_c$ - $\epsilon$ 의 거동과도 잘 대응하고 있다. 굽힘변형률에 대한 n 값의 저하거동은, 균열이 한 곳에서 발생하여 변형률이 증가하더라도 집중응력에 의해서 단락을 가져오는 인장변형의 경우의 n 값의 거동과는 다르다[6].

즉, Bi-2223테이프의 초전도체에 굽힘변형률에 의한 국부적인 균열 발생시 Ag 시-스부로 전

류분류에 따른 임계전류의 완만한 저하가 유사한 n 값의 이러한 변화를 가져왔다고 생각된다.

#### 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.

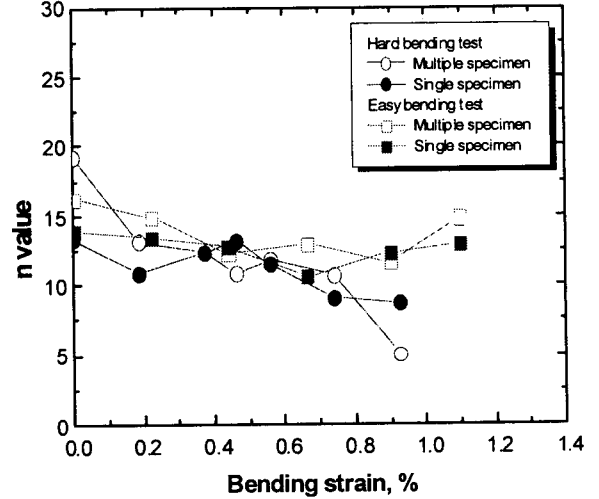


Fig. 7. Relation between n value and bending strain for hard bending and easy bending.

(2) 동일한 굽힘변형률에서 Hard bending의 경우가 Easy bending 시 보다 낮은  $I_c$ 를 나타냈다.

(3) 변형률증가에 따른 n 값의 저하는 Hard와 Easy bending 시 모두 다소의 저하를 가져왔고, 임계전류-변형률 거동과 유사하였다.

(4) Bi-2223테이프의  $I_c$  저하에 미치는 굽힘변형률의 영향 시험에서, Hard bending 시는 단일시험편을 사용한 경우가 복수시험편을 사용한 경우보다 낮은 값을 나타냈다. 이것은 단일시험편법에서 연속적인 홀더 교체시 시험편에 가해지는 thermal cycling에 의한 기계적 손상누적에 의한 것으로 생각된다. 따라서 기계적 변형을 부가하면서 시험편에서  $I_c$ 의 연속적인 측정이 가능한 새로운 굽힘변형 장치의 개발이 요구된다.

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

#### [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] H. Kitaguchi, K. Itoh, T. Takeuchi, K. Togano, H. Wada. Strain effect in Bi-based oxide/Ag superconducting tape. IEEE Trans. Applied Super. Vol, No. 11 pp.3058-3061 (2001).

[4] 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).

[5] 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).

[6] 신형섭, K. Katagiri. Bi-2212 초전도테이프에서 임계전류의 응력/변형을 특성에 미치는 외부장화의 영향. 한국초전도 저온공학회논문집. 3권 1호. pp.6-10 (2001).