

논문 20-6-12

## 외부보강된 밀봉 상태가 다른 Bi-2223테이프의 가압 LN<sub>2</sub>하에서 임계전류의 굽힘변형률 의존성

### Bending Strain Dependence of the Critical Current in Externally-reinforced Bi-2223 Tapes with Different Hermeticity under pressurized Liquid Nitrogen

신형섭<sup>1,a</sup>, John Ryan C Dizon<sup>1</sup>, 박정수<sup>1</sup>, Bonifacio Rolley<sup>1</sup>  
(Hyung-Seop Shin<sup>1,a</sup>, John Ryan C Dizon<sup>1</sup>, Jeong-Soo Park<sup>1</sup>, and Bonifacio Rolley<sup>1</sup>)

#### Abstract

The critical current degradation behaviors of multifilamentary Bi-2223 superconducting tapes under pressurized liquid nitrogen were investigated using a r-shaped sample holder which gives a series of bending strains to tape. Three kinds of externally-reinforced Bi-2223 tapes with different hermeticity were used as samples. The tape with the thicker reinforcement layer had a better bending strain tolerance of  $I_c$ , but when the bending strain was calculated at the outermost filament, the  $I_c$  degradation behavior became identical. For all samples,  $I_{c0}$  decreased with the increase of applied pressure, but the  $I_c$  degradation behavior with bending strain at each pressure level was similar. Furthermore, after depressurization from 1 MPa to atmospheric pressure,  $I_c$  was completely recovered to its initial values. When the samples were warmed up to room temperature after pressurization tests, the ballooning damage occurred at lower bending strain regions. The region where ballooning was observed was identical to the one where the significant  $I_c$  degradation occurred.

**Key Words** : Bi-2223 tapes, Bending strain effect, Critical current, Pressurized LN<sub>2</sub>, External reinforcement, Hermeticity

#### 1. 서론

Bi-2223 고온 초전도체(HTS)테이프를 전력 케이블, 모터와 같은 전력기에 사용할 경우, 제조와 냉각과정 및 운영시 다양한 형태의 응력과 변형률을 받게 된다[1-6]. 실제 응용분야에서 초전도체에 발생하는 응력 중 굽힘응력에 따른 변형이 권선 과정에서 초전도 선재나 테이프에 가장 흔히 발생한다[2,6]. 굽힘 변형을 받는 Bi-2223테이프의 임계전류,  $I_c$ 에 미치는 작동 환경 및 조건의 영향은 반드시 고려되어야 한다. 그중 특히 밀폐된 냉각용

저온 듀어내에서 기기의 작동시 냉매인 액체질소의 증발 등에 기인하는 가압이 Bi-2223테이프의 전송특성에 미치는 영향을 고려하여야 한다. 그러나 지금까지 Bi-2223테이프의 전송특성에 미치는 변형률효과(strain effect)는 주로 대기압 상태에서 연구되어 왔다[1-5].

액체질소(LN<sub>2</sub>)의 가압은 Bi-2223테이프 내부의 필라멘트 부분으로 LN<sub>2</sub>의 확산을 가속시키게 되고, 이것은 테이프가 77 K에서부터 승온될 경우 내부로 침투한 LN<sub>2</sub>가 급속히 기화하면서 테이프 단면의 부풀림(ballooning)현상을 일으키게 되고, 결과적으로 임계전류의 열화를 일으키게 된다[7]. 따라서 LN<sub>2</sub>의 가압이  $I_c$ 의 열화와 Bi-2223테이프의 부풀림 특성에 어떠한 영향을 미치는지를 조사하는 것은 중요하고, 이를 막기 위한 방안수립에 도움이 된다.

1. 안동대학교 기계공학부

(경북 안동시 송천동 388)

a. Corresponding Author : hsshin@andong.ac.kr

접수일자 : 2006. 9. 18

1차 심사 : 2007. 4. 25

심사완료 : 2007. 5. 18

임계전류의 열화 개시는 초전도 필라멘트에서 균열발생에 기인하고, 변형률의 증가에 따른  $I_c$ 의 열화특성은 발생한 균열의 성장과 더불어 영향을 받게 된다[5]. 지금까지 다심선화, 시스템 합금강화, 외부보강, HIP처리 등 다양한 제조공정의 도입을 통하여 Bi-2223 테이프의 기계적 특성과 임계허용변형률의 향상을 위한 시도가 성과를 내고 있다[5,7-9].

최근 HTS테이프에 대한  $I_c$ 의 굽힘 변형률 의존성은 일련의 굽힘변형률을 갖는 FRP시료 홀더[10]나 Goldacker식 굽힘 시험장치를 사용하여 연구가 이루어져 오고 있다[11]. 그러나 이들 시험법은 가압 LN<sub>2</sub>하에서 굽힘 시험법으로는 적합하지 않다. 따라서 최근 저자들에 의해 새로운 굽힘시험 절차가 개발되었고, 이를 가압 조건하에서  $I_c$ 의 굽힘변형률 특성 평가에 사용하였다[12].

본 연구에서는 외부보강한 Bi-2223테이프의 굽힘변형률에 따른 전송특성에 미치는 LN<sub>2</sub> 가압에 의한 영향을 조사하였다. 이를 위해  $\rho$ 자 형상을 한 시료홀더를 사용하여 HTS테이프에 일련의 굽힘 변형률을 부가하였고 스테인리스 듀어를 포함한 저온유지장치를 사용하여 LN<sub>2</sub>를 1 MPa(10기압)까지 가압하였다.

## 2. 실험 방법

본 연구에서는 외부보강된 밀봉상태가 다른 세 종류의 시판(AMSC사)의 다심선 Bi-2223/Ag 초전도 테이프를 시료로 사용하였다. 그림 1은 시료의 단면 모양을, 표 1은 시료의 특성을 나타내고 있다. 이들 시료는 powder-in-tube(PIT)공정으로 제작되었다. 초전도 필라멘트는 55심이다. 외부보강된 시료의 양 끝단을 밀봉처리하지 않은 경우는 ERT테이프, 시료의 한쪽 단만 밀봉 처리한 경우는 HST1테이프, 양쪽 단을 밀봉 처리한 경우는 HST2테이프로 각각 표기하였다.

가압한 LN<sub>2</sub>에서 굽힘시험에는 그림 2(a)와 같이 FPR로 만든  $\rho$ 자 형상 시료홀더와 그림 2(b)에 나타낸 바와 같은 저온 유지장치(cryostat)를 사용하였다[12]. 시료홀더에 Bi-2223테이프를 감아서 취부하면 시험편의 각 영역에는 0%, 0.2%, 0.4%, 0.6%, 0.8% 그리고 1.0%에 상당하는 공칭 굽힘 변형률이 걸리게 된다. 가압된 LN<sub>2</sub>하에서 굽힘시험의 절차는 참고문헌 [12]에 상세하게 기술되어 있다. 본 연구에서는 각 압력 레벨까지 가압후 30분 경과한 시점에서  $I_c$ 측정을 실시하였다.

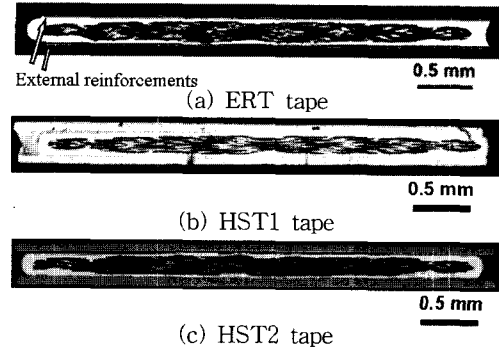


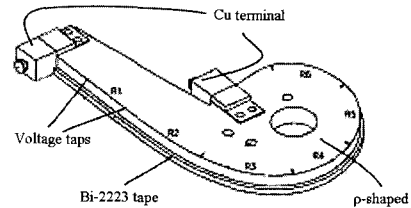
그림 1. Bi-2223테이프의 단면 모양.

Fig. 1. Cross-sectional views of Bi-2223 tapes.

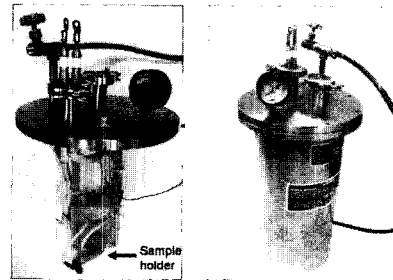
표 1. Bi-2223 테이프의 사양.

Table 1. Specifications of Bi-2223 tapes.

	ERT	HST1	HST2
Dimension (mm)	4.2 x 0.3	4.2 x 0.38	4.2 x 0.38
$I_c$ at 77K (A)	138	133	155
Reinforcement material	Stainless steel	Brass	Brass
Reinforcement thickness ( $\mu$ m)	40	80	80
Multi-filament bundle layer thickness (mm)	0.19	0.19	0.19
Hermetic Sealing	None	One side	Both sides



(a) A sample holder which gives a series of bending strains to Bi-2223 tapes



(b) View of the cover assembly of cryostat for pressurization test of LN<sub>2</sub>

그림 2. 가압 LN<sub>2</sub>하에서  $I_c$ - $\epsilon_b$ 관계의 측정용 장치.

Fig. 2. Devices used to measure  $I_c$ - $\epsilon_b$  relationship under pressurized LN<sub>2</sub>.

테이프 선재에 걸린 공칭 굽힘 변형률은 시료의 바깥 표면에서의 값으로 정의되었고, 이때 테이프에 걸린 공칭 굽힘 변형률,  $\epsilon_b$ 는 Eq. (1)을 사용하여 계산한다.

$$\epsilon_b = \frac{t}{2R+t} \times 100\% \quad (1)$$

여기서  $t$ 는 시료두께,  $R$ 은 각각의 전압단자간 간격에 해당하는 굽힘부 반경을 나타내고, 각 전압단자간 간격은 각각 20 mm이다. 임계전류 측정시 V-I 선도는 4단자법을 사용하여 77 K, 0 T에서 측정하였다. 임계 전류는  $1 \mu V/cm$  전기장 기준으로 구하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

각 Bi-2223 테이프의 대기압하에서 임계전류의 굽힘변형률효과를 그림 3에 나타내고 있다. 두 HST테이프가 ERT테이프보다 우수한 임계전류의 굽힘 변형률 특성을 나타내는 것을 볼 수 있다. 95%  $I_c$ 로 정의한 임계 비가역변형률,  $\epsilon_{irr.b.}$ 은 ERT, HST1, HST2의 각 테이프에 대하여 각각 0.71%, 0.88% 그리고 0.89%로 차를 나타내었다. 그 차이는 HST선재의 외부보강재로 사용된 황동박판(foil)이 EST테이프에 사용된 스테인리스 박판보다 두껍기 때문이다. 따라서 선재고유의 임계변형률특성은 외부보강재 두께의 효과를 배제한 상태에서 비교하는 것이 필요하고, 이를 위해  $I_c$ 의 열화동을 Bi-2223 필라멘트 부분에 부가된 굽힘변형률에 대하여 계산하여 나타내었다. 각 시료의 필라멘트에 걸리는 굽힘변형률은 Eq. (1)의 분자부  $t$ 를  $t_f$ 로 치환하여 계산한다. 여기서  $t_f$ 는 선재단면상의 Bi-2223 초전도 필라멘트 다발부의 두께를 나타낸다. 임계전류를 최외각 필라멘트에서 구한 굽힘변형률에 대하여 나타내었을 때, 임계 비가역변형률,  $\epsilon_{irr.b.}$ 는 0.44%로, 모든 선재에 대하여 동일한 값을 나타내었다.

그림 4(a), (b) 그리고 (c)는 각 선재에 대하여 1 MPa까지 각 압력 레벨에서 굽힘변형률에 따른  $I_c$ 의 열화거동을 나타내고 있다. 모든 테이프에서  $I_c$ 의 열화거동은 부가된 압력 레벨에 의존하는 거동을 나타내, 압력 레벨이 높을수록  $I_{c0}$ 값은 저하하였다. 무차원화한  $I_c/I_{c0}$ 의 굽힘변형률 의존성은 압력 레벨에 따라서 다소의 분산은 존재하지만, 임계전

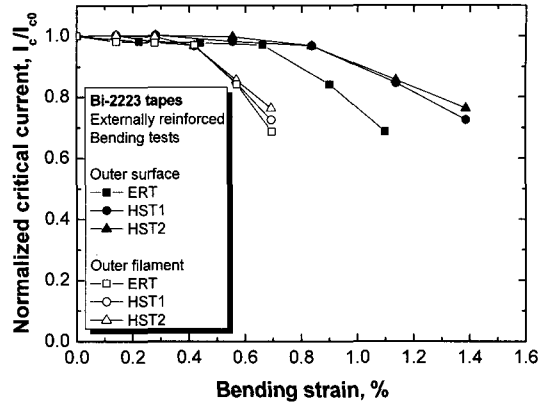


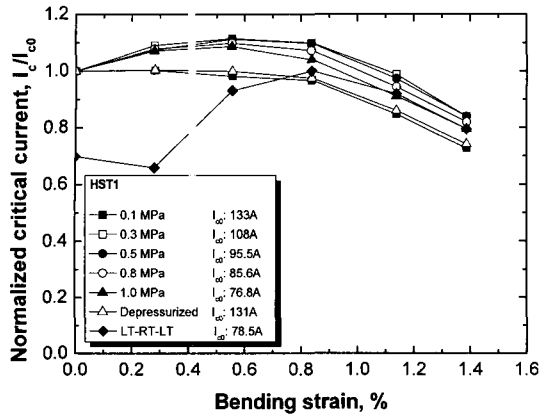
그림 3. 모든 테이프에 대한  $I_c$ 의 굽힘변형률 의존성.  
Fig. 3.  $I_c$ -Bending strain dependence of all Bi-2223 tapes.

류는 굽힘변형률과 더불어 피크치까지 증가한 후 감소하는 거동을 나타내, 전체적으로 유사한  $I_c/I_{c0} - \epsilon_b$  거동을 나타내었다.

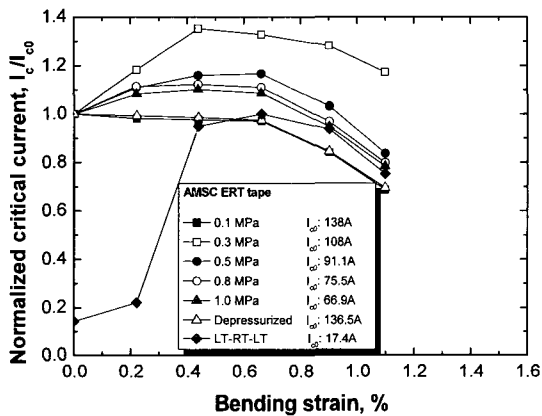
한편 1 MPa 까지 Bi-2223테이프를 가압한 후, 대기압 상태로 압력을 감압, 회복시킨 후, 가압이  $I_c$ 에 미치는 영향을 조사하였다. 대기압으로 회복한 경우, 모든 시료는 초기  $I_c$  값으로 완전히 회복되어 있는 것을 볼 수 있다. 이러한 결과는 1 MPa까지  $LN_2$ 의 가압은 비록  $I_{c0}$ 의 압력 의존적 거동을 나타냈지만, 초전도 필라멘트에 cracking과 같은 영구 손상을 초래하지 않았다는 것을 의미한다.

시료의 밀봉처리 효과를 보기 위해, 1 MPa까지 가압으로 인해 시료 내부에 침투한  $LN_2$ 가  $I_c$ 거동에 미치는 영향을 살펴보기 위해 대기압으로 감압한 후 시료에 77 K-RT-77 K의 열 사이클을 부가하였고, 그 후  $I_c$ 를 측정하여 그 결과(◆)를 그림 4에 병기하였다. 모든 시험편에서 굽힘변형률이 낮은 영역에서는 임계전류의 현저한 저하를 나타내는데, 그 정도는 밀봉된 정도가 양호할수록 작게 나타났다. 그러나 모든 시료에서 0.6% 이상의 굽힘변형률 영역에서는 열화가 나타나지 않았다. 아울러 시료의 두께 측정을 통해, 가압으로 인한 시료단면의 부풀림(ballooning)에 의한 손상의 발생여부를 파악하였다.

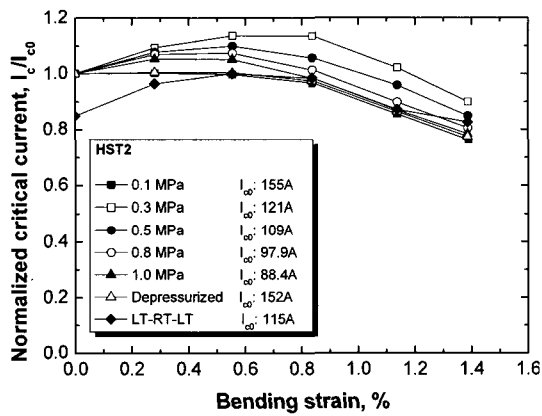
그 결과, 각 시료에서 부풀림이 심하게 일어난 영역은  $I_c$ 의 현저한 저하를 나타낸 영역에 해당한다는 것을 알 수 있었다. 부풀림 손상은 가압시험 동안 시료의 결합이나 절단부를 통하여 시료내부로 침투한  $LN_2$ 가 77 K에서 상온으로 온도가 상승



(a) ERT tape



(b) HST1 tape



(c) HST2 tape

그림 4. 가압에 따른 Bi-2223테이프의 임계전류 열화거동.

Fig. 4.  $I_c$  degradation behaviors in Bi-2223 tapes during pressurization tests.

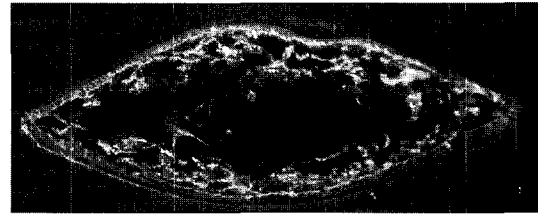


그림 5. 가압시험후 ERT테이프의  $\epsilon_b=0$  %부에서 단면 양상.

Fig. 5. Cross-sectional view of ERT tape at  $\epsilon_b=0$  % after pressurization test.

함에 따라 LN<sub>2</sub>의 급속한 기화에 의해서 야기되었다[7,12]. 이러한 부풀림 현상은 Bi-2223테이프 내부의 필라멘트의 절단이나 정렬상태의 흐트러짐을 수반하였고, 이로 인해 해당영역에서  $I_c$ 의 현저한 저하를 가져왔다[7]. 특히 양단이 밀봉 처리 되지 않은 (a) ERT테이프 및 (b) HTS1테이프에서 부풀림 현상이 현저하게 발생하였다. 부풀림과 그에 따른  $I_c$ 의 열화는 시료의 직선부분( $\epsilon_b=0\%$ )이나 비교적 작게 굽은 부분에서 주로 발생하였다. 가압 시험 후 ERT테이프에 발생한 부풀림 손상의 예를 그림 5에 나타내고 있다. 시료홀더가 테이프에 큰 굽힘 변형률을 부가하여 구조적인 구속을 부여하는 부분에서는 부풀림의 발생이 억제 되었다는 것을 알 수 있다[12]. 이러한 결과로부터 초전도 전력 케이블과 같은 실제 응용시, Bi-2223 테이프는 어느 정도의 굽힘변형률을 받는 코일 상태로 감아서 사용되므로, 그로 인해 부풀림현상의 발생은 구조적으로 다소 억제될 것으로 예상된다.

#### 4. 결론

외부 보강된 Bi-2223테이프 선재의 경우, 보강재가 두꺼울수록 우수한  $I_c$ 의 결보기 굽힘 변형률 특성을 나타내었지만, 초전도 필라멘트부에서 계산된 굽힘 변형률에 대해서는 동일한 임계 비가역 변형률값을 나타내었다. 모든 시료에서  $I_{c0}$ 는 부가 압력레벨의 증가에 따라 감소하였지만, 각 압력레벨에서 굽힘변형률에 따른  $I_c$ 의 열화거동은 유사하였다. 그리고 1 MPa까지 가압한 후 대기압으로 회복한 경우,  $I_c$ 는 대기압 상태의 값으로 완전히 회복되었다. 가압시험후 시료를 열사이클을 부가한 시료에서는 국부적인 부풀림현상이 관찰되었다. 이때 굽힘변형률에 의한  $I_c$ 의 열화가 일어난 부분과 부

폴립 손상의 발생부분은 일치하였고, 밀봉이 불충분한 테이프의 경우에는 굽힘변형률이 낮은 부분에서 부폴립 손상이 두드러지게 발생하였다.

### 감사의 글

본 연구는 21세기프론티어 연구개발 연구개발사업단인 차세대초전도응용기술개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었다. JRC Dizon는 한국과학기술진흥재단의 지원에 감사를 드린다 (MOEHRD) (KRF-225-D00182).

### 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, p. 639, 2000.
- [2] H. S. Shin and K. Katagiri, "Critical current degradation behaviour in Bi-2223 superconducting tapes under bending and torsion strains", *Supercond. Sci. Tech.*, Vol. 16, p. 1012, 2003.
- [3] B. ten Haken, H. H. ten Kate, and J. Tenbrink, "Compressive and tensile axial strain reduced critical currents in Bi-2212 conductors", *IEEE. Trans. Appl. Supercond.*, Vol. 5, p. 1298, 1995.
- [4] P. Skov-Hansen, Z. Han, and J. I. Bech, "Stresses and strains in multifilament HTS tapes", *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol. 9, p. 2617, 1999.
- [5] J. W. Ekin, D. K. Finnermore, Q. Li, J. Tenbrink, and W. Carter, "Effect of axial strain on the critical current of Ag-sheathed Bi-based superconductors in magnetic fields up to 25T", *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 61, p. 858, 1992.
- [6] T. Kuroda, K. Itoh, K. Katagiri, W. Goldacker, W. Haessler, B. ten Haken, et al, "Bending strain effect on critical current of Bi-2223 superconductor tapes---report of international round-robin-test", *Physica C*, Vol. 425, p. 111, 2005.
- [7] K. Yamazaki, S. I. Kobayashi, T. Kato, K. Ohkura, M. Ueyama, J. Fujikami, N. Ayai, E. Ueno, M. Kikuchi, K. Hayashi, K. I. Sato, and R. Hata, "Development of Bi-based Superconducting Wires", *SEI Technical Review-English edition*, ISSU, p. 16, 2004.
- [8] C. G. King, D. A. Grey, A. Mantone, K. G. Herd, and E. T. Laskaris, "Mechanical stabilization of BSCCO-2223 superconducting tapes", *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol. 7, p. 2046, 1997.
- [9] H. S. Shin and K. Katagiri, "Influence of external reinforcement on stress/strain characteristics of critical current in Ag/BSCCO superconducting tapes", *Proc. Int. Workshop Mechano-Electromagnetic Property of Composite Superconductor*, Kobe, p. 31, 2001.
- [10] K. Itoh, T. Kuroda, and H. Wada, "VAMAS round robin test on bending strain effect measurement of Bi-2223 tapes", *Physica C*, Vol. 382, p. 7, 2002.
- [11] W. Goldacker, S. I. Schlachter, R. Nast, H. Reiner, S. Zimmer, H. Kiesel, and A. Nyilas, "A new bending technique for investigation of  $I_c$  vs. bending strain behavior of BSCCO(2223) tapes", *Proc. Int. Workshop on Superconductivity*, Kobe, Japan, p. 21, 2001.
- [12] H. S. Shin, J. R. C. Dizon, H. Y. Choi, D. W. Ha, and S. S. Oh, "Deformation and  $I_c$  degradation behavior in bent Bi-2223 tapes under pressurized liquid nitrogen", *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol. 16, p. 1051, 2006.