

Bi-2223 초전도테이프 임계전류의 굽힘하에서 인장변형을 특성

신형섭^{*}, 오상수^{**}, 허동우^{**}

^{*} 안동대학교, ^{**} 안동대학교 기계공학부, ^{***} 한국전기연구원 초전도응용연구팀

Effect of tensile strain on I_c degradation characteristics in Bi-2223 superconducting tapes under bending

H. S. Shin^{*}, S. S. Oh^{**}, D. W. Ha^{**}

^{*} Andong National University, School of Mechanical Engineering
^{**} Korea Electrotechnology Research Institute

hsshin@andong.ac.kr

Abstract- The influences of mixed mode of bending-tension on the I_c degradation and their interaction on the strain effect were evaluated in this study. A test fixture which applies a mixed deformation mode of bending-tension to HTS tapes has been newly devised. When the strain induced in the tape due to the mixed deformation mode was expressed as a total tensile strain, the irreversible strain to the critical current degradation of Bi-2223 tapes increased when compared with the case of simple bending mode, and the value at both ends were larger than that at the central region of the bend part. The I_c degradation behavior at the region exceeding the irreversible strain showed quite a rapid drop of the I_c when compared with the simple bending cases. As the applied bending strain increased, namely, as the diameter of mandrel adopted decreased, the apparent irreversible strain of Bi-2223 tapes increased. However, the increment decreased as the mandrel diameter decreased. As a result, it could be found that the tension to be applied to the Bi-2223 tapes during cabling of HTS tapes should be smaller, as the mandrel diameter becomes smaller.

1. 서 론

Bi-기 산화물 고온 초전도체의 제작기술과 냉동공학의 지속적인 발전은 다양한 전력기기에 HTS선재 사용에 대한 기대를 높여 오고 있다. 이러한 초전도체를 마그네트와 전력기기에 적용하게 되면, 제작, 냉각, 운전시 여러 가지 형태의 응력이나 변형률을 받게 된다[1,2]. 그 예

로, 와인딩부에서 후프응력(인장변형률), 냉각시 열수축률 차에 따른 압축변형률, 선재의 와인딩 과정에서 발생하는 굽힘 변형, 그리고 와인딩시의 국부적인 접촉이나 코일부 체결시 가해지는 압력으로 인한 횡방향압축 변형 등을 들 수가 있다. 특히, 높은 J_c 와 자장은 초전도테이프에 큰 로렌츠력을 미치게 되어 인장 후프응력뿐만 아니라 도체의 횡방향압축을 발생시키게 된다. 이들 기계적 응력/변형률은 초전도특성의 저하를 초래하여, 각각의 하중 모드에서 초전도선재의 기계-전자기적특성 평가에 관한 연구가 필요하다. 그간 HTS테이프의 임계전류 변형률효과(strain effect)에 관해서는 굽힘을 비롯한 각 부하모드에 대하여 많은 연구가 이루어져 오고 있다.

한편 초전도 코일이나 마그넷, 모터, 케이블의 제조과정 또는 운전중 초전도테이프는 굽힘을 받은 상태에서 장력이 걸리게 된다[3]. 그러나 이러한 혼합 모드에서 초전도테이프의 임계전류 열화 특성 및 이들의 상호작용(interaction)의 영향에 관해서는 아직 알려져 있지 않은 실정이다. 따라서 부과응력/변형률의 관리를 통한 초전도 코일의 적용분야 확대 및 설계 데이터 확보를 위해서는 HTS테이프의 임계전류 열화에 미치는 각 부하 형태에 따른 영향뿐만 아니라 혼합 모드에서 임계전류의 열화거동에 대한 연구가 필요하다.

통상, HTS테이프에 걸리는 전체 변형률 값은 선재에 걸리는 각각의 부하 형태에서 변형률을 중첩하여 구할 수 있고, 그 값이 임계변형률보다 작아야 한다는 것이 테이프의 설계 기준이다[2].

$$\epsilon_{total} = \epsilon_{tension} + \epsilon_{bending} + \epsilon_{twisting} < \epsilon_c \quad (1)$$

고온 초전도선재를 전력케이블에 응용하기 위한 설계데이터 확보측면에서, 테이프 권선시 예상되는 굽힘변형하에서 장력의 작용에 따른 임계전류의 열화특성에 관한 평가가 필요하다.

따라서 본 연구에서는, 시판 Bi- 2223초전도

테이프의 임계전류에 미치는 인장-굽힘 혼합 모드에서 임계전류 열화특성의 평가를 위한 시험절차와 변형률의존성에 관한 연구결과를 보고하고자 한다.

2. 실험 방법

본 연구에서는 초전도선재의 인장-굽힘혼합 하중모드에서 기계-전기적특성 평가를 위해, 스텐레스강 박판으로 테이프의 양면을 적층 보강한 시판의 다심 필라멘트 Bi-2223선재(laminated wire; AMSC사)을 사용하였다. Fig. 1은 선재의 단면사진을 나타내고 있다.



AMSC (55 filaments, $I_c = 125$ A)

Fig. 1. Cross-sectional view of sample supplied.

Bi-2223테이프의 임계전류에 미치는 변형률 효과평가를 위해, 먼저 선재의 ①인장시험, ②굽힘시험 그리고 ③굽힘하 인장 혼합모드 시험을 각각 수행하였다. 먼저 인장시험은 Fig. 2(a)에 보인 인장시험용 치구를 사용하여 수행하였다. 저온에서 선재에 발생한 변형률 측정에는 시험편 상하부 고정그립 사이에 설치한 클립게이지를 사용하였다. 한편 테이프의 굽힘시험의 경우, 특정 곡률반경을 갖는 일련의 시료홀더(mandrel)에 테이프를 감아 해당 변형률을 부여하는 방식을 사용하였다[4]. Fig. 2(b)는 굽힘시험용 시료홀더를 사용한 초전도테이프의 굽힘시험 과정의 개략도를 보여주고 있다.

HTS 테이프의 굽힘-인장 모드에서 시험을 위해 굽힘하 인장모드에서 임계전류의 열화시험용 치구를 고안하였고, 그 개략도를 Fig. 3에 나타내고 있다. 테이프에 변형률의 부가양식은, 특정 굽힘 변형률을 부여하는 FRP제 Mandrel에 테이프를 \cap 자형으로 감아서 굽힘변형을 가한 상태에서 테이프의 양단을 인장하여 인장변형률을 부가하는 방식으로 되어 있다. 이때 Mandrel의 테이프 접촉부에는 톱니형 홈을 내어 접촉면적을 줄이고자 하였다. 본 연구에서는 굽힘변형률 0.4%, 0.5%, 0.6%, 0.8%를 갖는 Mandrel을 사용 하였다.

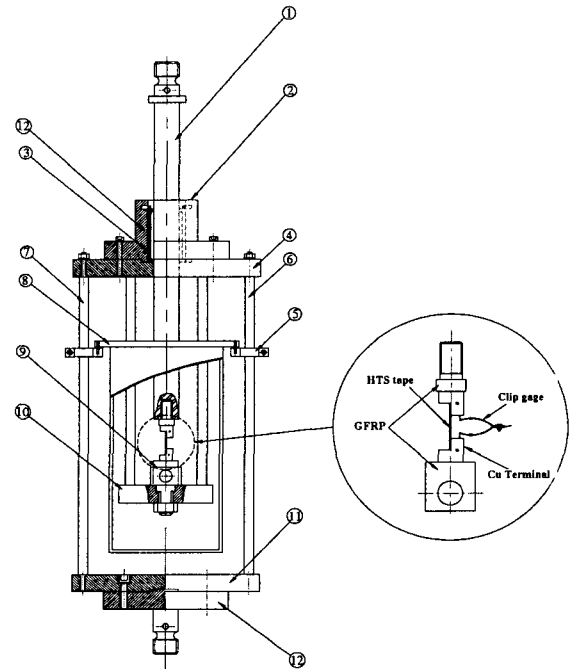
각 하중모드 시험에서 전류단자간 게이지부 길이(gage length)는, 인장의 경우는 40mm, 굽힘의 경우는 70mm로 하였다. 전압단자는 선재의 중앙부에 인장시는 20mm, 굽힘의 경우는 30mm 간격으로 설치하였다. 한편 혼합 모드에서는, 전류단자간 거리는 150-180mm의 범위를 갖는다. 테이프가 굽힘부를 포함하여 \cap 형으로 되어 있어서, 인장시 양측에서 균일한 하중 작용

여부의 확인이 필요하다. 이를 위해, 전압단자를 선재의 직선부 양쪽과, 굽힘부에서는 양쪽 굽힘 개시부와 중앙부 등 5개소에 각각 20mm 간격으로 설치하여 인장변형률의 증가에 따른 직선부와 굽힘부에서 임계전류의 열화거동 및 상호작용을 조사하였다. 임계전류(I_c)는 4단계법을 사용하여 $1 \mu\text{V}/\text{cm}$ 전기장 기준으로 측정하였다.

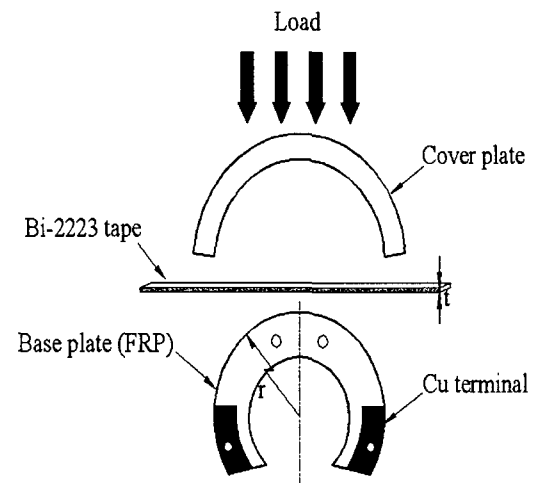
3. 실험결과 및 고찰

3.1. 단일 부하모드에서 변형률 효과

먼저, Fig. 4(a)는 스텐레스강 테이프의 외부



(a) Apparatus for tensile test at 77K.



(b) Sample holder for easy bending test

Fig. 2. Illustrations of apparatus and fixtures for tensile and bending tests of tapes.

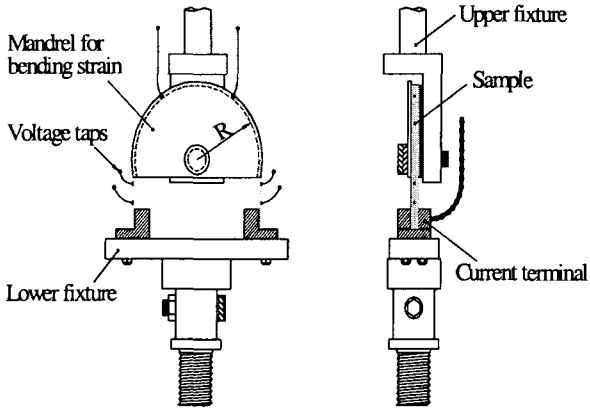


Fig. 3. Schematics of fixture for I_c - ϵ evaluation in bending-tension mixed mode of HTS tapes.

강한 다심 필라멘트 Bi-2223테이프의 77K에서 인장시험 결과 얻어진 응력-변형률선도를 나타내고 있다. 이 선도로부터 마그네트와 코일 제작에 필요한 설계인자인 영률, 항복강도, 연신율 등의 특성치를 구할 수 있고, 77K에서 영률은 약 70 GPa, 항복강도(0.2% offset)는 약 490 MPa를 나타내었다.

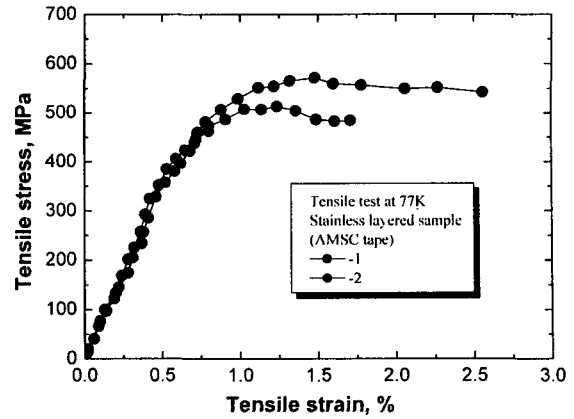
Fig. 4(b)는 측정부 길이 40mm, 전압단자 간격 20mm를 갖는 단척시료(short sample)에 대한 임계전류의 인장변형률 의존성을 나타내고 있다. 전체적으로 변형률이 0.4 %를 넘어서면서 초전도 필라멘트부에 균열 도입과 더불어 임계전류의 급격한 저하를 나타내고 있다. 이러한 Bi-2223선재의 인장변형률특성은, $I_c/I_{c0}=0.95$ 로 정의한 비가역 변형률, $\epsilon_{t,irr.} = 0.48\%$ 이다. 한편 인장응력에 대한 임계전류의 가역임계응력, $\sigma_{irr.} = 340$ MPa이다.

Fig. 5는 시료홀더를 연속적으로 교체하면서 Bi-2223 테이프의 Easy bending 모드에서 상온에서 굽힘변형을 가한 후, 77K에서 측정한 임계전류의 굽힘변형률 의존성을 나타내고 있다. AMSC선재의 경우, 외부보강으로 인해 보강하지 않은 선재에 비하여 현저한 변형률특성의 개선을 나타내고 있다. 굽힘변형시 비가역 임계변형률, $\epsilon_{b,irr.}=0.8\%$ 로 종래의 외부보강하지 않은 Bi-2223선재에 비하여 현저한 임계변형률의 증가를 나타내었다. 또한 굽힘의 경우는 앞서 인장 변형시와는 달리, 굽힘변형률이 0.8%이후에도 임계전류는 비교적 서서히 저하하는 거동을 나타내었다.

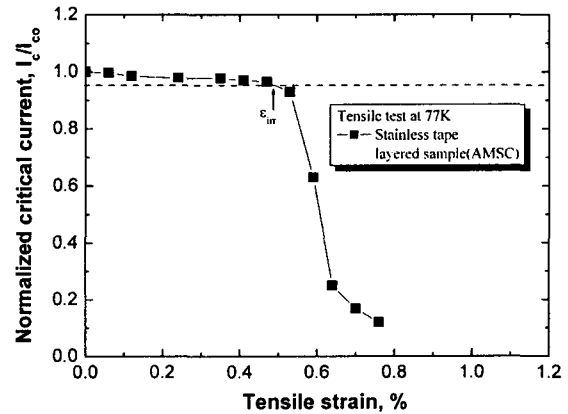
따라서 혼합모드에서 시험에는 초기 굽힘변형률값으로, $\epsilon_b=0.4, 0.5, 0.6$ 그리고 0.8% 로 한 상태에서, 인장변형률을 부가하는 방식으로 임계전류의 열화거동을 파악하고자 하였다.

3.2 굽힘-인장 혼합모드에서 임계전류의 변형률 효과

Bi-2223테이프를 맨드릴에 감은 굽힘변형상



(a) Stress-strain curves



(b) $I_c/I_{c0} - \epsilon$ relationship

Fig. 4. Results of tensile test at 77K.

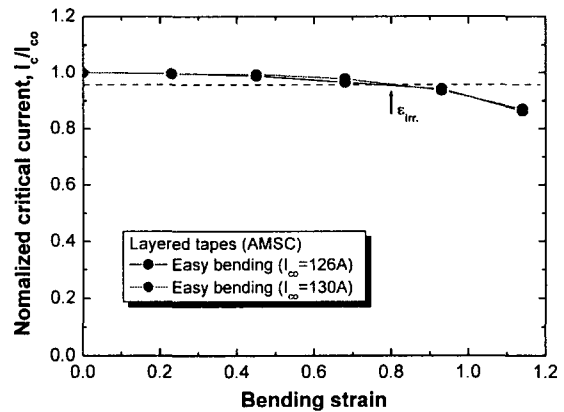


Fig. 5. I_c/I_{c0} vs. bending strain in externally layered Bi-2223 samples.

태에서 인장력이 작용하게 되면, 테이프에는 굽힘변형률과 더불어 인장변형률이 발생하게 된다. 이때 HTS테이프의 임계전류에 미치는 변형률효과는 테이프와 맨드릴 사이에 존재하는 마찰과 맨드릴이 테이프 변형시 기판(substrate)로 작용하는 관계로 앞 절의 단순 인장 또는 굽힘시와는 다른 효과가 예상된다. 그림 6-9는 초기 굽힘 변형률을 달리한 상태에서 인장변형률의 증가에 따른 테이프의 직선부(인장부)와 굽힘부(굽힘-인장부)

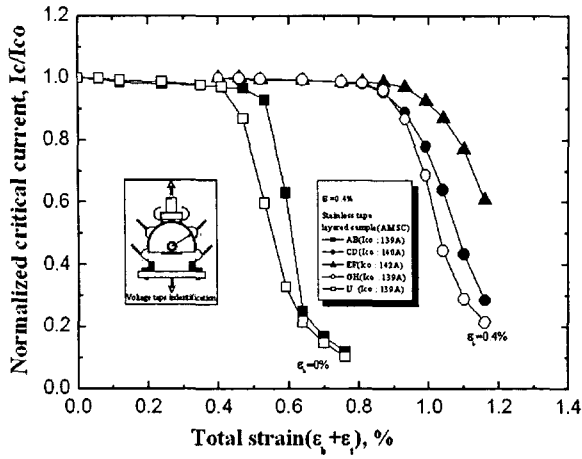


Fig. 6. I_c/I_{c0} vs. total strain in mixed mode of bending and tension at $\epsilon_b=0.4\%$.

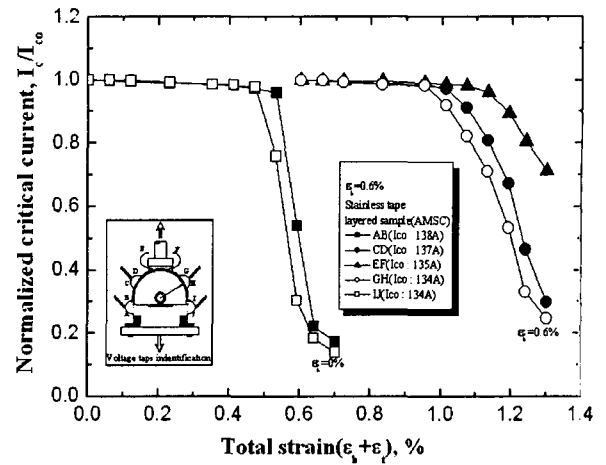


Fig. 8. I_c/I_{c0} vs. total strain in mixed mode of bending and tension at $\epsilon_b=0.6\%$.

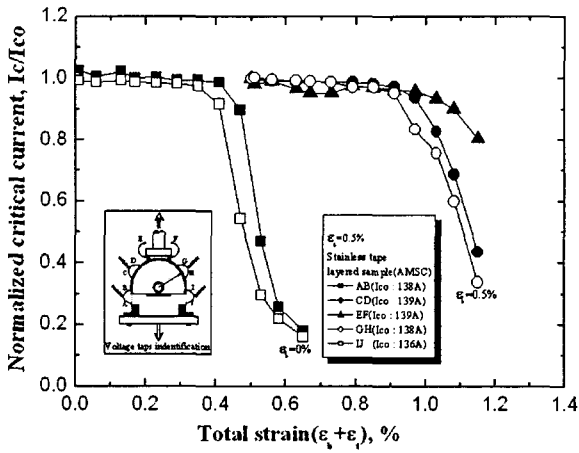


Fig. 7. I_c/I_{c0} vs. total strain in mixed mode of bending and tension at $\epsilon_b=0.5\%$.

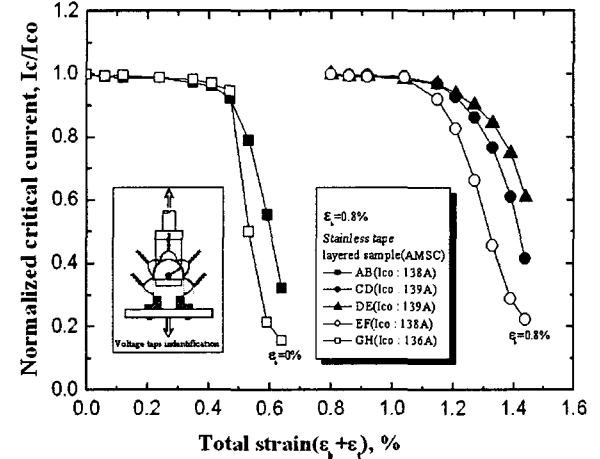


Fig. 9. I_c/I_{c0} vs. total strain in mixed mode of bending and tension at $\epsilon_b=0.8\%$.

에서 임계전류의 열화거동을 나타내고 있다. 여기서, 종축은 테이프에 발생한 전체 인장변형률 값으로 초기 부가 굽힘변형률과 테이프에 발생한 인장변형률의 합으로 나타내었다.

먼저, 그림 6는 초기 굽힘변형률 $\epsilon_b=0.4\%$ 를 부가한 경우로, 앞 절에서 $I_c/I_{c0}=0.95$ 로 정의한 단순인장시 비가역변형률 $\epsilon_{t,irr}=0.48\%$, 굽힘시 $\epsilon_{b,irr}=0.8\%$ 이었다는 것을 고려하면, 직선 구간 AB와 IJ에서 I_c 의 열화거동은 그림 4와 비슷하였고, 양쪽 모두 거의 유사한 열화거동을 나타내고 있다. 한편 굽힘부에서는 초기 부가 굽힘변형률에 기인하는 임계전류(I_{c0})의 열화는 나타나지 않았고, 양 끝단 구간 CD와 GH에서는 비가역 변형률, $\epsilon_{irr,b1}=0.86\%$, 중간부분 구간 EF에서는 $\epsilon_{irr,b2}=0.94\%$ 를 나타내, 단순 굽힘시보다 증가하는 것을 알 수 있다. 또한 가역구간 내에서도 변형률증가에 따른 I_c 의 저하거동은 현저하지 않고 인장변형률 의존성과 유사한 거동을 나타내는 것을 볼 수 있다. 굽힘부에서 비가역변형률 이후 영역에서 임계전류의 열화거동을 보면, 먼

저 양끝단에서는 단순 인장하 보다는 다소 완만 하지만 단순 굽힘하의 경우보다는 급격한 임계전류 저하를 나타내었다. 또한 굽힘부 중간부분은 테이프에 맨드렐이 부착되어 기판 역할을 함으로 인해 인장력에 기인하는 영향은 크게 나타나지 않았지만, 순수 굽힘의 경우보다 큰 임계전류의 열화거동을 나타내었다. 부가 굽힘변형률이 증가함에 따라, 굽힘부에서 비가역 변형률이 함께 증가하는 것 이외에는 임계전류의 열화거동에는 큰 차이가 없는 것을 그림 7, 8, 9로부터 알 수 있다. 특히 그림 9에서는 큰 초기 굽힘변형률의 부가로 인해 굽힘부의 초기 임계전류 임계전류(I_{c0})이 다소 낮은 값을 알 수 있다.

각각의 굽힘변형률에 대하여 Bi-2223테이프의 각 구간에서 구한 임계전류의 비가역변형률 값을 표 1에 정리하였다. 맨드렐의 직경이 감소할수록 즉 부가 굽힘변형률이 증가할수록, 임계전류의 결보기 비가역변형률은 증가하는 경향을 나타내고 있다. 그러나 그 증가량은 굽힘변형률에는 달하지 않아서, 표 1의 마지막 행에 나타낸 차는,

Table 1. Irreversible strain values on voltage tap separations at each initial bending strain

Nominal bending strain		Straight part $\epsilon_{t,irr}$, %	Bend parts		$\epsilon_{irr.1(b+t)} - \epsilon_b$, % (margin strain)
ϵ_b , %	Mandrel diameter, mm		$\epsilon_{irr.1(b+t)}$, % (at both ends)	$\epsilon_{irr.2(b+t)}$, % (at central region)	
0.4	74.7	0.45	0.86	0.94	0.46
0.5	59.7	0.40	0.90	0.98	0.40
0.6	49.7	0.44	0.96	1.13	0.36
0.8	37.2	0.45	1.10	1.24	0.30

굽힘변형률이 증가할수록, 즉 맨드렐의 직경이 감소할수록 감소하는 경향을 나타내었다.

따라서 테이프의 케이בל링시 가할 수 있는 인장변형률(장력)의 마진은 맨드렐의 직경이 감소함에 따라서 감소하는 것을 알 수 있다. 이것은 테이프의 굽힘부에서는 테이프와 맨드렐 사이에 존재하는 마찰이 테이프에 걸리는 장력 전달을 완화시키게 되고, 이로 인해 단순인장부에 걸리는 인장변형률 값을 굽힘변형률에 단순 증첩하여 구한 굽힘부의 겉보기 인장변형률보다 실제 테이프의 굽힘부에는 낮은 인장변형률이 발생하였기 때문이다. 이로 인해 전체 인장 변형률로 정리한 경우, 굽힘부에는 단순 굽힘하 임계전류의 변형률효과보다 높은 strain tolerance를 나타내게 되었다. 또한 테이프소재의 굽힘부에서 임계전류의 완만한 열화거동은 FRP 맨드렐이 기관 역할을 함으로 인해 단순인장부에서 발생하는 균열의 도입에 따른 변형의 집중없이, 비교적 균일한 변형을 가져왔기 때문으로 생각된다.

4. 결론

Bi-2223 테이프에 대한 임계전류특성에 미치는 굽힘-인장 혼합모드의 영향을 평가하였다. 77K에서 HTS 테이프에 굽힘-인장 혼합 변형 모드의 부하가 가능한 시험치구 및 시험법을 개발하였다. 굽힘-인장 혼합 변형모드에서 Bi-2223테이프에 걸리는 변형률을 전체 인장 변형률로 정리한 경우, 임계전류의 비가역변형률은 단순굽힘시보다 증가하였고, 그 값은 굽힘부의 중간부분이 양 끝단보다 큰 값을 나타내었다. 또한 비가역변형률 이후 영역에서 임계전류의 열화거동은 단순 인장시 보다는 다소 완만하지만 단순 굽힘의 경우보다는 훨씬 급격한 저하를 나타내었다. 테이프에 부가된 굽힘변형률이 증가할수록 즉 맨드렐의 직경이 감소할수록, 임계전류의 겉보기 비가역변형률은 증가하였지만, 그 증가량은 굽힘 변형률이 증가할수록 감소하는 경향을 나타내었다. 따라서 테이프의 케이בל링시 가할 수 있는 인장변형률(장력)의 마진은 맨드렐의 직경이 감소함에 따라서 작아져야 한다는 것을 알 수 있었다.

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 차세대초전도응용기술개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었다. 아울러 임계전류측정시 실험에 협조해 준 안동대학교 대학원 기계설계전공 김병수군, 공과대학 기계공학부 최호연군, 이인영군에게 감사를 드린다.

(참 고 문 헌)

- [1] K. Osamura, M. Sugano, T. Wada and S. Ochiai, "Mechanical properties of Ag/Bi2223 composite superconductors", 2000, Adv. Cryo. Eng. Materials, Vol.46, pp.639-645.
- [2] P. Skov-Harsen, Z. Han and J. I. Bech, stresses and strains in multi-filament HTS tapes, IEEE trans. Applied Superconductivity. Vol, No.2 pp.2617-2620 (1999).
- [3] D. Dietderich, R. M. Scanlan, T. Hasegawa, Y. Aoki, R. S. Sokolowski and L. R. Motowidlo, IEEE Trans. Applied Super., Vol. 11, pp. 3577-3570 (2001).
- [4] K. Itoh, T. Kuroda and H. Wada, VAMAS round robin test on bending strain effect measurement of Bi-2223 tapes, Physica C, Vol. 382, pp. 7-11 (2002).
- [5] W. Goldacker, S. I. Schlachter, R. Nast et al. Bending strain investigations on BSCCO(2223) tapes at 77K applying a new bending technique, 2001, Proc. Int. Workshop on Mechano-electro magnetic property of composite superconductors, pp. 21-25.
- [6] H. S. Shin, S. Y. Choi, H. S. Ha, D. W. Ha and S. S. Oh, IEEE Trans. Applied Supercond., Vol. 13 (2003), pp. 3526-3529.