

굽힘상태의 외부보강한 Bi-2223 초전도테이프에서 임계전류 열화특성에 미치는 인장변형률의 영향

Effect of Tensile Strain on I_c Degradation Characteristics in Bent Externally Reinforced Bi-2223 Superconducting Tapes

신형섭*, 김기현*, 오상수**, 하동우**

H. S. Shin*, K. H. Kim*, S. S. Oh**, D. W. Ha**

Abstract- The influences of mixed strain mode of bending-tension on the critical current, I_c in externally reinforced Bi-2223 tapes and their interaction were investigated in this study. A test fixture which providing a mixed deformation mode of bending-tension to HTS tapes has been newly devised. When the total strain induced in the tape in the mixed strain mode was expressed by the superposition of the bending and tensile strains, the irreversible strain for the critical current degradation of Bi-2223 tapes increased, as compared with the simple bending mode case. The I_c degradation at the region exceeding the irreversible strain showed a medium between the simple bending case and the simple tension case. As the initial bending strain imparted increased, namely as the diameter of mandrel adopted decreased, the apparent irreversible strain in Bi-2223 tapes increased, but the increment became smaller. As a result, it can be found that the tension to be applied to bent Bi-2223 tapes during cabling should be smaller, as the mandrel diameter becomes smaller.

Key Words: Bi-2223/Ag tape, strain effect, mixed strain mode, I_c degradation.

1. 서 론

Bi-기 산화물 등 고온 초전도체의 제작기술과 냉동공학의 지속적인 발전은 다양한 전력기에 HTS선재의 사용에 대한 기대를 높여 오고 있다. 이러한 초전도체를 전력기와 마그네트에 적용하게 되면, 제작, 냉각, 운전시 여러 가지 형태의 응력이나 변형을 받게 된다[1,2]. 그 예로, 와인딩부에서 후프응력(인장변형률), 냉각시 열수축률 차에 따른 압축변형률, 선재의 와인딩 과정에서 발생하는 굽힘 및 비틀림 변형, 그리고 와인딩시의 국부적인 접촉이나 코일부 체결시 가해지는 압력으로 인한 횡방향압축 변형 등을 들 수가 있다. 이들 기계적 응력/변형률은 선재의 초전도특성, 특히 임계전류의 저하를 초래하여, 각각의 하중 모드에서 초전도선재의 기계-전자적

특성 평가에 관한 연구가 필요하다. 그간 HTS테이프에 대한 임계전류의 변형률효과(strain effect)에 관해서는 BSCCO테이프를 중심으로 굽힘을 비롯한 각 부하모드에 대하여 많은 연구가 이루어져 오고 있다[2~4].

한편 초전도 케이블이나 코일, 마그넷, 모터의 권선 및 제조과정에서 초전도테이프는 감기거나 굽은 상태에서 장력이 걸리게 된다[5]. 그러나 이러한 혼합 변형률 모드에서 초전도테이프의 임계전류 열화 특성 및 이들의 상호작용(interaction)의 영향에 관해서는 아직 알려져 있지 않은 실정이다. 따라서 부하 응력/변형률의 관리를 통한 초전도 코일의 적용분야 확대 및 설계 데이터 확보를 위해서는, HTS테이프의 임계전류에 미치는 각 부하 모드에서 뿐만 아니라 혼합 모드에서 임계전류의 열화거동에 대한 연구가 필요하다.

통상, HTS테이프에 걸리는 전체 변형률 값은 선재에 걸리는 각각의 부하 형태에서 변형률 값들을 중첩하여 구하게 되고, 그 값이 임계변형률보다 작아야 한다는 것이 HTS테이프의 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 굽힘 변형하에서 장력의 작용에 따른 임계전류의 열화특성에 관한 평가가 필요하다.

따라서 본 연구에서는, 외부보강한 시판 Bi-2223 초전도 테이프의 임계전류에 미치는 굽힘-인장 변형 모드에서 변형률 특성 평가를 위한 시험절차와 초전도 테이프의 임계전류 열화에 미치는 변형률 특성에 관한 결과를 보고하고자 한다.

2. 실험 방법

본 연구에서는 굽힘-인장의 혼합 변형률모드에서 초전도선재의 기계-전기적특성 평가를 위해, 스텐레스강 박판으로 테이프의 양면을 적층 보강한 시판의 다심 필라멘트 Bi-2223선재(laminated wire; AMSC사)를 사용하였다. 그림 1은 선재의 단면사진을 나타내고 있다.

Bi-2223테이프의 임계전류에 미치는 변형률 특성 평가를 위해, 먼저 선재의 ①인장시험, ②굽힘시험 그리고 ③굽힘하 인장 혼합모드 시험을 각각 수행하였다. 먼저 단순 인장시험은 그림 2(a)에 보인 인장시험용 치구를 사용하여 수행하였다. 저온에서 선재에 발생한 변형률 측정에는 시험편의 상하부 고정그립(Cu 전류단자를 겸함)사이에 설치한 클립게이지를 사용하였다. 한편 테이프의 단순 굽힘시험의 경우, 특정 곡률반경을

* 정 회 원 : 안동대학교 기계공학부

** 정 회 원 : 한국전기연구원 초전도재료연구그룹

원고접수 : 2004년 3월 06일

심사완료 : 2004년 3월 24일

갖는 일련의 시료홀더(mandrel)에 테이프를 감아 해당 굽힘변형률을 부여하는 방식을 사용하였다[6]. 그림 2(b)는 단순 굽힘시험용 시료홀더를 사용한 초전도테이프의 굽힘시험 과정의 개략도를 보여주고 있다.



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

그림 1. 시험재의 단면 양상.
Fig. 1. Cross-sectional view of sample supplied.

HTS 테이프의 굽힘-인장 혼합모드에서 시험을 위해 굽힘하에서 인장력의 부하가 가능한, 임계전류 측정시험용 치구를 고안하였다. 그 개략도를 그림 3에 나타내고 있다. HTS테이프에 변형률의 부과양식은, 특정 굽힘 변형률에 해당하는 곡률반경을 갖는 FRP제 맨드렐에 초전도테이프를 \cap 자형으로 감아서 초기 굽힘 변형을 가한 상태에서 테이프의 양단을 하방으로 인장하여 인장변형률을 부과하는 방식으로 되어 있다. 이때 맨드렐의 테이프 접촉부에는 돌기형 홈을 내어 접촉면적을 줄이고자 하였다. 본 연구에서는 초기 굽힘 변형률 0.4%, 0.5%, 0.6% 그리고 0.8%를 갖는 맨드렐을 사용 하였다.

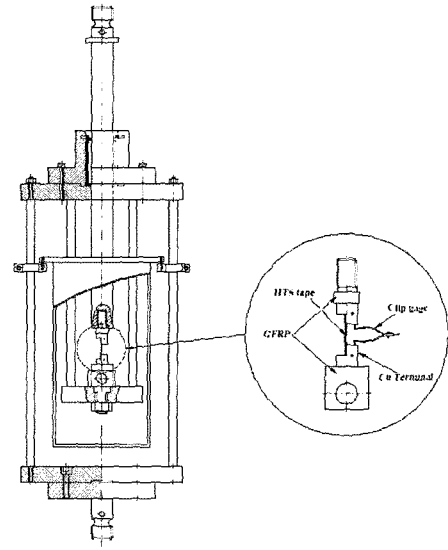
각 하중모드 시험에서 전류단자간 게이지부 길이 (gage length)는, 인장의 경우는 40 mm, 굽힘의 경우는 70 mm로 하였고, 전압단자간 간격은 그 중앙부에 인장시는 20 mm, 굽힘의 경우는 30 mm로 하였다. 한편 혼합 변형률 모드 시험에서는, 전류단자간 거리는 150~180 mm의 범위를 갖는다. 테이프가 굽힘부를 포함하여 \cap 형으로 되어 있어서, 인장시 양측에서 균일한 하중의 작용여부 확인이 필요하다. 이를 위해, 전압단자를 테이프선재의 양쪽 직선부(단순인장부)와, 굽힘부(굽힘-인장변형률 작용부)에서는 양쪽 굽힘개시부와 중앙부 등 5개소에 각각 20 mm 간격으로 설치하여 임계전류의 열화거동을 조사하였다. 이때 굽힘부에 존재하는 접촉부 마찰은 선재의 길이를 따라서 증가하여 단면에 걸리는 장력을 완화시키게 된다. 모든 시험에서 임계전류(I_c)는 4단자법을 사용하여 $1 \mu W/cm$ 전기장 기준으로 측정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

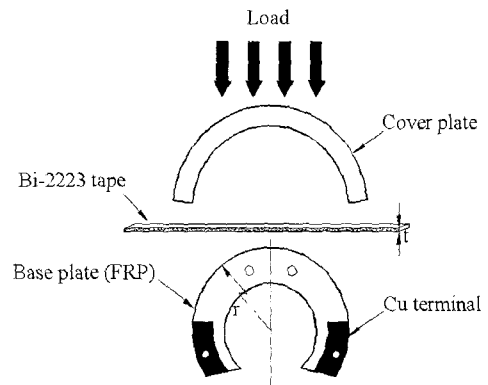
3.1. 외부보강한 Bi-2223테이프의 단일 변형률 모드에서 임계전류의 변형률 특성

먼저, 그림 4는 스테인레스강 테이프외부보강한 다심 필라멘트 Bi-2223테이프의 77K에서 인장시험 결과 얻어진 응력-변형률선도를 나타내고 있다. 외부보강하지 않은 Ag합금/Bi-2223선재의 항복강도가 140 MPa 안팎인 점을 고려하면(7), 훨씬 높은 강도특성을 나타내는 것을 알 수 있다. 이 선도로부터 코일 제작에 필요한 설계인자인 영률, 항복강도 등의 특성치를 구할 수 있다. 77K에서 외부보강한 Bi-2223테이프의 영률은 약 70 GPa, 항복강도(0.2% offset)는 약 490 MPa이다.

그림 5 (a), (b)는 단척시료(short sample)에 대한 임계전류의 인장변형률 및 인장응력 의존성을 나타내고 있다. 전체적으로 인장변형률이 0.4%, 또는 인장응력이 200 MPa를 넘어서면서 초전도 필라멘트부에



(a) Apparatus for tensile test at 77K.



(b) Sample holder for easy bending test

그림 2. 테이프의 인장 및 굽힘시험용 장치와 치구의 개략도

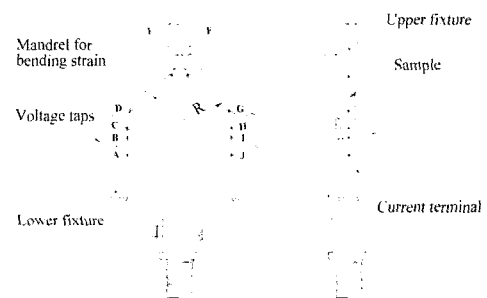


Fig. 2 Illustrations of apparatus and fixtures for tensile and bending tests of tapes.

그림 3. HTS 테이프의 굽힘-인장혼합모드에서 임계전류-변형률특성 평가를 위한 시료홀더의 개략도.
Fig. 3. Schematics of fixture for I_c - ϵ evaluation in bending-tension mixed mode of HTS tapes.

균열 도입과 더불어 임계전류의 급격한 저하를 나타내고 있다. 이러한 Bi-2223선재의 인장변형률특성은, $I_c/I_{c0} = 0.95$ 로 정의한 비가역 임계변형률, $\epsilon_{c,irr} = 0.48\%$ 이다. 인장응력에 대한 임계전류의 비가역임계응력, $\sigma_{irr} = 340 MPa$ 이

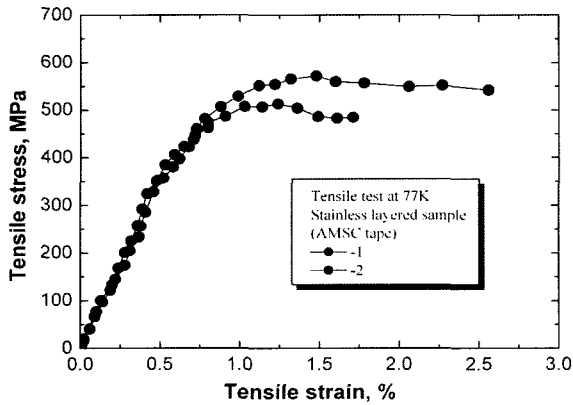


그림 4. 77K에서 외부보강한 Bi-2223테이프의 응력-변형률선도.
Fig. 4 Stress-strain curves of externally reinforced Bi-2223 tapes at 77K.

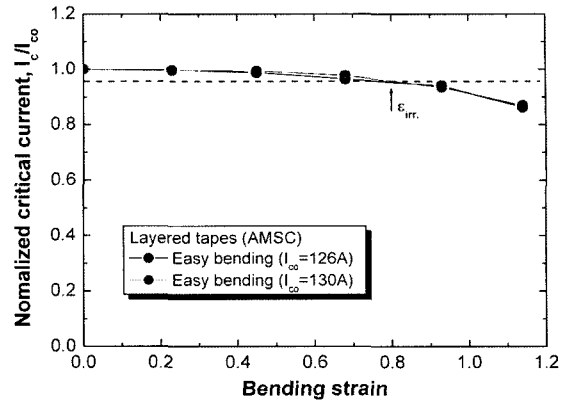
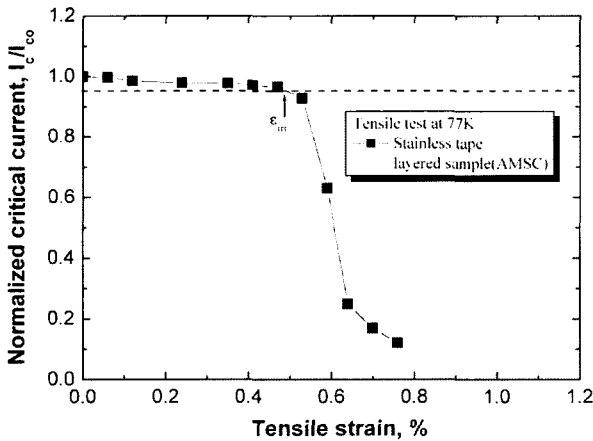
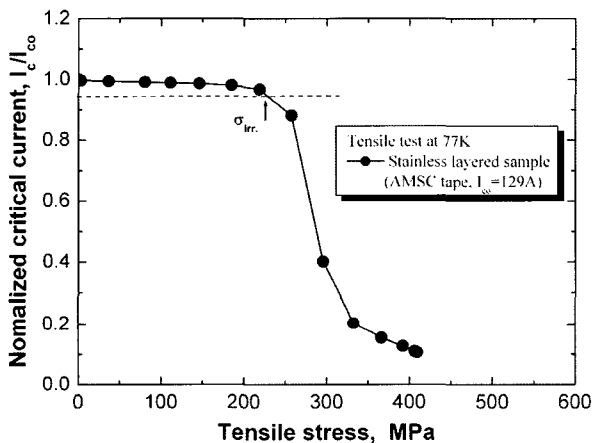


그림 6. 외부보강한 Bi-2223 선재의 단순굽힘 모드에서 임계전류의 열화특성.
Fig. 6. I_c degradation behavior in externally reinforced Bi-2223 tapes in simple bending mode.



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



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

그림 5. 외부보강한 Bi-2223테이프의 단순인장 모드에서 임계전류의 열화 특성.
Fig. 5. I_c degradation behavior in externally reinforced Bi-2223 tapes in simple tensile mode.

다. 이로부터 외부보강한 Bi-2223테이프에서는, 테이프 전체가 항복응력보다 낮은 응력값에서도 이미 초전도 필라멘트부에는 균열이 발생하여 임계전류의 열화가 발생하였다. 한편 외부보강한 Bi-2223테이프의 경우, 인장하중하에서 일어나는 변형의 국부적인 집중을 막

아 균일변형을 보장하기 때문에, 외부보강하지 않은 Bi-2223테이프에서 발생하는 결보기 비가역변형률의 증대[8]와 같은 거동은 나타나지 않았다.

그림 6은 시료홀더를 연속적으로 교체하면서 Bi-2223 테이프의 쉬운 굽힘(easy bending) 모드에서 상온에서 굽힘변형을 가한 후, 77K에서 측정된 임계전류의 굽힘변형률 의존성을 나타내고 있다. 외부 보강한 Bi-2223테이프의 경우, 굽힘변형시 비가역 임계변형률, $\epsilon_{b,irr} = 0.8\%$ 로 종래의 외부보강하지 않은 Bi-2223 선재에 비하여 현저한 임계변형률의 증가를 나타내었다. 이것은 외부보강재인 스테인레스박판(SUS304)이 초전도테이프보다 높은 탄성계수와 큰 열팽창계수를 갖는 관계로 인해, 77K에서 테이프의 초전도필라멘트부에 걸리는 잔류압축변형률이 증가하였기 때문이다. 이때 초전도선재의 각 구성요소의 면적분율을 고려한 혼합법칙(mixture rule)을 사용하면, 필라멘트부에 걸리는 잔류변형률의 크기를 계산할 수 있다.

또한 굽힘의 경우는 앞서 인장변형시와는 달리, 굽힘변형률이 0.8% 이후에도 임계전류는 비교적 서서히 저하하는 특성을 나타내었다[3]. 따라서 굽힘-인장 혼합 모드에서 시험시 초기 굽힘변형률 값으로, $\epsilon_b = 0.4, 0.5, 0.6$ 그리고 0.8%로 한 상태에서, 인장변형률을 추가하는 방식으로 임계전류의 열화거동을 파악하고자 하였다.

3.2 외부보강한 Bi-2223테이프의 굽힘-인장 혼합모드에서 임계전류의 변형률 특성

Bi-2223테이프를 맨드릴에 감은 굽힘변형 상태에서 인장력이 작용하면, 테이프에는 굽힘변형률과 더불어 인장변형률이 발생하게 된다. 이때 HTS테이프의 임계전류에 미치는 변형률효과는 테이프와 맨드릴 사이에 존재하는 마찰과 맨드릴이 테이프 변형시 기판(substrate)으로 작용하는 관계로 인해, 앞 절의 단순인장(simple tension) 또는 단순굽힘(simple bending)시와는 다른 효과가 예상된다. 그림 7~그림 10는 초기 굽힘변형률, ϵ_b 를 달리하여 굽힘 상태에서 인장변형률의 증가에 따른 테이프의 직선부(단순인장)와 굽힘부(혼합 모드)에서 임계전류의 열화 특성을 나타내고 있다. 여기서, 종축은 테이프에 발생한 전체 인장변형률 값, 즉 초기 굽힘변형률, ϵ_b 에 테이프에 발생한 인장변형률, ϵ_t 를 중첩한 값으로 나타내었다.

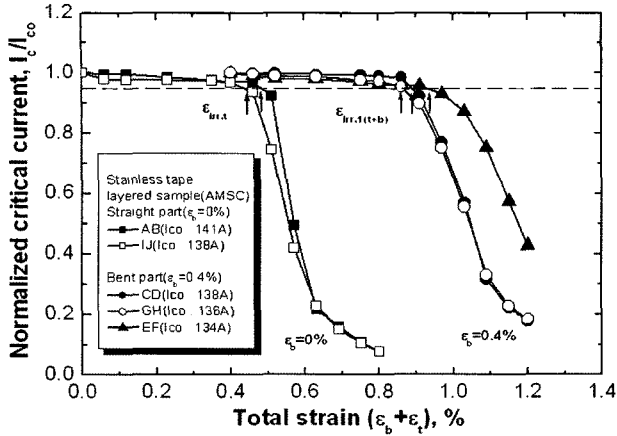


그림 7. $\epsilon_b=0.4\%$ 의 혼합변형률 모드에서 외부보강한 Bi-2223테이프의 임계전류 열화특성.
Fig. 7. I_c degradation behavior in externally reinforced Bi-2223 tapes in mixed mode of bending-tension of $\epsilon_b=0.4\%$.

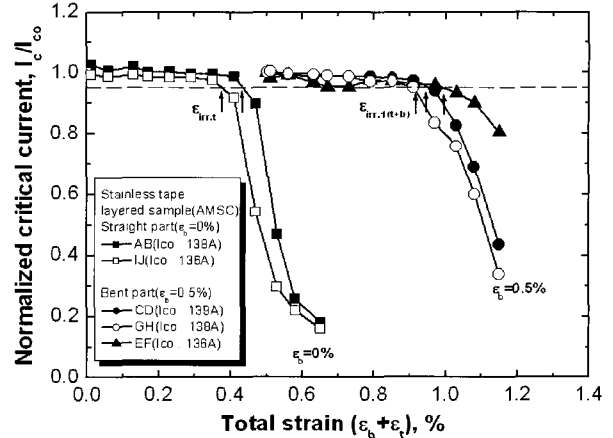


그림 8. $\epsilon_b=0.5\%$ 의 혼합변형률 모드에서 외부보강한 Bi-2223테이프의 임계전류 열화특성.
Fig. 8. I_c degradation behavior in externally reinforced Bi-2223 tapes in mixed mode of bending-tension of $\epsilon_b=0.5\%$.

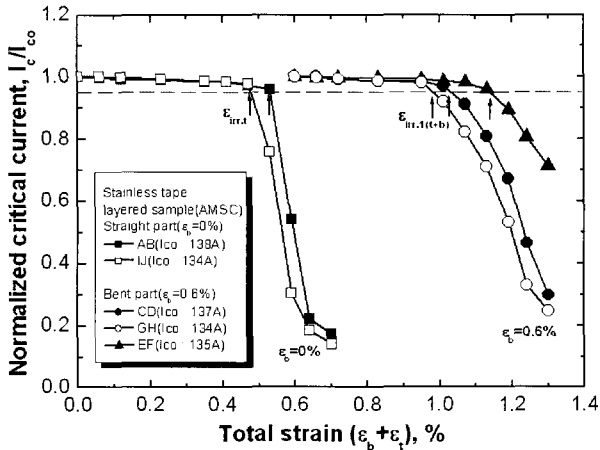


그림 9. $\epsilon_b=0.6\%$ 의 혼합변형률 모드에서 외부보강한 Bi-2223테이프의 임계전류 열화특성.
Fig. 9. I_c degradation behavior in externally reinforced Bi-2223 tapes in mixed mode of bending-tension of $\epsilon_b=0.6\%$.

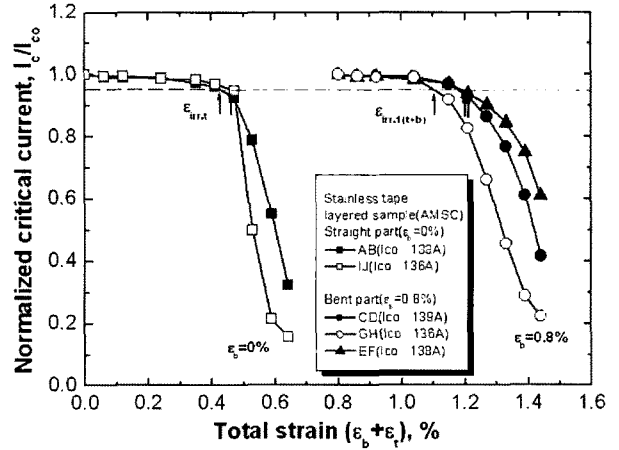


그림 10. $\epsilon_b=0.8\%$ 의 혼합변형률 모드에서 외부보강한 Bi-2223테이프의 임계전류 열화특성.
Fig. 10. I_c degradation behavior in externally reinforced Bi-2223 tapes in mixed mode of bending-tension of $\epsilon_b=0.8\%$.

먼저, 그림 7은 초기 굽힘변형률 $\epsilon_b=0.4\%$ 를 부과한 경우로, 앞 절에서 $I_c/I_{c0}=0.95$ 로 정의한 단순인장시 비가역 임계변형률 $\epsilon_{t,irr}=0.48\%$, 굽힘시 $\epsilon_{b,irr}=0.8\%$ 이었다는 것을 고려하면, 직선부 AB와 IJ에서 I_c 의 열화거동은 그림 5와 비슷하였고, 양쪽 모두 거의 유사한 열화거동을 나타내었다. 한편 굽힘부에서는 초기 굽힘변형률 부가에 기인하는 임계전류(I_{c0})의 열화는 거의 나타나지 않았고, 양쪽 굽힘개시부 CD와 GH에서는 비가역 변형률, $\epsilon_{irr,b1}=0.86\%$, 중간부분 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 않았다. 굽힘부에서 비가역변형률 이후 영역에서 임계전류의 열화거동을 보면, 먼저 양 굽힘개시부에서는 단순 인장하 보다는 다소 완만하지만 단순 굽힘하의 경우보다는 급격하여, 중간 정도의 임계전류 저하를 나타내었다. 또한 굽힘부 중간부분은 초전도테이프에 맨드렐이 기판(substrate) 역할을 하면서 그 사이에 존재하는 마찰력이 부가된 인장력을 완화시켜서 그 영향이 크게 나타나지 않았다.

한편 초기 굽힘변형률 ϵ_b 가 증가함에 따라서 외부보

강한 Bi-2223테이프의 굽힘부에서 임계전류 열화에 대한 비가역 임계변형률이 함께 증가하는 것 이외에는 임계전류의 열화거동에는 큰 차가 없는 것을 그림 8, 9, 10에서 볼 수 있다. 특히 그림 10에서와 같이, 초기 굽힘변형률이 큰 경우, 굽힘부의 초기 임계전류 (I_{c0})가 다소 낮은 값을 나타냄을 알 수 있다.

각각의 초기 굽힘변형률에 대하여 Bi-2223테이프의 각 구간에서 구한 임계전류의 비가역변형률 값을 표 1에 정리하였다. 맨드렐의 직경이 감소할수록, 즉 부과한 초기 굽힘변형률이 증가할수록, 임계전류의 길보기 비가역변형률은 증가하는 경향을 나타내었다. 그러나 그 증가량은, 즉 표 1의 마지막 행에 나타난 초기 굽힘변형률과의 차는, 굽힘변형률이 증가할수록, 즉 맨드렐의 직경이 감소할수록 감소하는 경향을 나타내었다.

따라서 Bi-2223테이프의 케이블링시 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 실제 Bi-2223테이프의 굽힘부에는 초기 굽힘

표 1. 각 초기 굽힘변형률 값에서 측정된 전압단자 간격에서의 임계전류 열화 비가역변형률.
Table 1. Irreversible strain values on voltage tap separations at each initial bending strain.

Nominal bending strain		Straight region $\epsilon_{t,irr}$, %	Bent region		$\epsilon_{irr,1(b+t)} - \epsilon_b$, % (margin strain)
ϵ_b , %	Mandrel diameter, mm		$\epsilon_{irr,1(b+t)}$, % (at starting regions)	$\epsilon_{irr,2(b+t)}$, % (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

변형률에 단순인장부에 걸리는 인장변형률 값을 단순 중첩하여 구한 전체 길보기 인장변형률보다 낮은 변형률이 발생하였기 때문이다. 따라서 전체 변형률로 나타낼 경우, 굽힘부에는 단순 굽힘하 임계전류의 변형률효과보다 높은 strain tolerance를 나타내게 되었다. 굽힘에 의한 테이프의 단면내에서 변형률 분포는 구배를 나타내. 초전도필라멘트의 위치에 따라서 다르지만, 인장력에 의한 변형률은 단면에 균일하게 작용함으로, 이들의 중첩에 의해 임계전류전류의 열화거동을 나타낼 경우, 비가역변형률 값은 순수 굽힘하에서의 경우 보다 약간의 마진을 갖게 된다. 한편 초전도테이프의 굽힘부에서 임계전류의 완만한 열화거동은 FRP 맨드릴이 기관 역할을 함으로 인해 단순인장부에서 발생하는 균열의 도입에 따른 변형의 집중없이, 비교적 균일한 변형을 가져왔기 때문으로 생각된다.

4. 결 론

외부보강한 Bi-2223초전도테이프에 대한 임계전류의 열화특성에 미치는 굽힘-인장 혼합모드의 영향을 평가 하여 얻어진 결과는 아래와 같다.

(1) 77K에서 HTS 테이프의 임계전류에 미치는 굽힘-인장 혼합 변형률 모드의 부하가 가능한 시험치구 및 시험법을 개발하였다.

(2) 외부보강한 Bi-2223테이프의 굽힘-인장 혼합 변형모드에서 변형률을 전체 인장 변형률로 나타낸 경우, 임계전류의 비가역변형률은 단순굽힘시보다 증가하였고, 비가역변형률 이후 영역에서 임계전류의 열화거동은 단순 인장과 단순 굽힘 경우의 중간을 나타내었다.

(3) Bi-2223테이프에 부가된 굽힘변형률이 증가할수록, 즉 맨드릴의 직경이 감소할수록, 임계전류의 길보기 비가역변형률은 증가하였지만, 그 증가량은 굽힘 변형률이 증가할수록 감소하는 경향을 나타내었다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 차세대초전도응용기술개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었다. 아울러 임계전류 측정시 실험에 협조해 준 당시 안동대학교 대학원 석사과정생 김병수군, 공과대학 기계공학부생 이인영군에게 감사사를 드린다.

참 고 문 헌

- [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] P. Skov-Harsen, Z. Han and J. I. Bech, Stresses and strains in multi-filament HTS tapes, IEEE trans. Applied Superconductivity, Vol. 9, No.2 pp. 2617-2620 (1999).
- [3] H. S. Shin, S. Y. Choi, D. K. Ko, H. S. Ha, D. W. Ha and S. S. Oh, "A comparison of strain effect on critical current in Bi-2223 superconducting tapes in different bending modes" IEEE trans. Applied Superconductivity, Vol 13, No.2 pp. 2526-2529 (2003).
- [4] S. S. Oh, D. W. Ha, H. S. Ha, C. Park, Y. K. Kwon, K. S. Ryu and H. S. Shin, "Influence of transverse compressive stress on Ic degrdation of Ag sheathed Bi-2223 tapes", Supercond. Sci. Tech., Vol. 17, pp. 130-134 (2004).
- [5] 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).
- [6] 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).
- [7] K. Osamura, M. Sugano and K. Matsumoto, "Mechanical property and its influence on the critical current of Ag/Bi2223 tapes", Supercond. Sci. Tech., Vol. 16, pp. 971-975 (2003).
- [8] H. S. Shin, K. Katagiri, "Influence of stress/strain on transport critical current measurement for HTSC" Adv. in Superconductivity XI, pp. 1470-645, (1998).

저 자 소 개



신형섭(申亨燮)
1959년생, 03월 27일생,
1981년 경북대 기계공학과 졸업,
1991년 Tohoku대 대학원 졸업(공학
박사), 현재 안동대학교 공과대학
기계공학부 교수



김기현(金基鉉)
1976년생, 2003년 안동대학교 기계공학과
졸업, 현재 안동대학교 대학원 기계설계
공학과 석사과정 재학



하동우(河東雨)
1962년 7월 12일 생, 1985년 경북대
금속공학과 졸업, 1987년 동 대학원
졸업(공학석사), 현재 연세대 대학원
금속공학과 졸업(공학박사),
1987년~현재 한국전기연구원 초전도
재료연구그룹 선임연구원.



오상수(吳詳秀)
1959년 11월 1일 생, 1982년 경북대
금속공학과 졸업, 1992년 Kyoto대 대
학원 졸업(공학박사), 현재 한국전기연
구원 초전도재료연구그룹
책임연구원