

인장-굽힘모드에서 Bi-2223 초전도 테이프의 임계전류 열화거동

신형섭*, 김병수**, 최호연**, 오상수***, 하동우***, 하홍수***

*안동대학교 기계공학부, **안동대학교 대학원, ***KERI 초전도응용연구사업팀**

Degradation Behavior of Critical Current in Bi-2223 Superconducting Tape in Bending-Tension Mixed Mode

Hyung-Seop Shin*, Byung-Soo Kim*, Ho-Yeon Choi*, Sang-Soo Oh**, Dong-Woo Ha** and Hong-Soo Ha***
Andong National Univ., KERI**

Abstract

HTS superconducting tapes are now commercially available for practical applications such as magnets and cables. Since superconductors in such applications are subjected to high mechanical loads that can significantly degrade the superconducting properties, mechanical properties and the strain tolerance known as the strain effect on superconducting properties are needed to be estimated for developing superconducting devices. Influences of loading mode on the I_c degradation and the interaction on strain effect were discussed in this study.

Key Words : Strain Effect, Critical Current, Tension-Bending Mixed Modes, Bi-2223 tapes.

1. 서론

Bi-기 산화물 고온 초전도체의 제작기술과 냉동 공학의 지속적인 발전은 다양한 전력기와 같은 보다 실제적인 응용분야에 HTS선재 사용에 대한 기대를 높여 오고 있다. 이러한 초전도체를 마그넷과 전력기기에 적용하게 되면, 제작, 냉각, 운전 시 여러 가지 형태의 응력이나 변형률을 받게 된다[1,2]. 그 예로, 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/변형률의 작용은 초전도특성의 저하를 초래하여, 각각의 하중 모드에서 초전도선재의 기계-전자기적특성 평가에 관한 연구가 필요하다.

한편 초전도 코일이나 마그넷, 모터, 케이블의 제조과정 또는 운전중 초전도테이프는 장력을 가한 상태에서 굽힘을 받게 된다[3]. 그러나 이러한 혼합 하중모드에서 초전도테이프의 임계전류 열화 특성 및 이들의 상호작용의 영향에 관해서는 아직

알려져 있지 않은 실정이다. 따라서 부과응력/변형률의 관리를 통한 초전도 코일의 적용분야 확대 및 설계 데이터 확보를 위해서는 HTS테이프의 임계전류 저하에 미치는 각 부하 형태에 따른 영향 및 혼합부하 형식에서 임계전류의 열화거동에 대한 연구가 필요하다.

통상, HTS테이프에 걸리는 전체 변형률 값은 선재에 걸리는 각각의 부하 형태에서 변형률을 중첩하여 구할 수 있고, 그 값은 임계변형률보다 작아야 한다는 것이 테이프의 설계 기준이 된다.

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

본 연구에서는, 고온 초전도선재를 전력케이블에 응용하기 위한 설계데이터 확보측면에서, 시판 Bi-2223초전도 테이프의 임계전류에 미치는 인장-굽힘 혼합하중모드에서 임계전류의 열화특성에 관한 실험적 연구결과를 보고하고자 한다.

2. 실험방법

2.1. 시험편

본 연구에서는 초전도선재의 인장-굽힘혼합 하중모드에서 기계-전기적특성 평가를 위해, 스텐레

스강 박판으로 테이프의 양면을 적층 보강한 시판의 다심 Bi-2223선재(laminated wire; AMSC사)를 사용하였다. Fig. 1은 선재의 단면사진을 나타내고 있다.

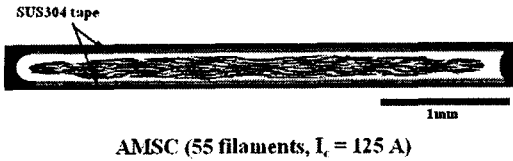


그림 1. HTS 테이프의 단면사진.
Fig. 1. Cross-sectional view of sample supplied.

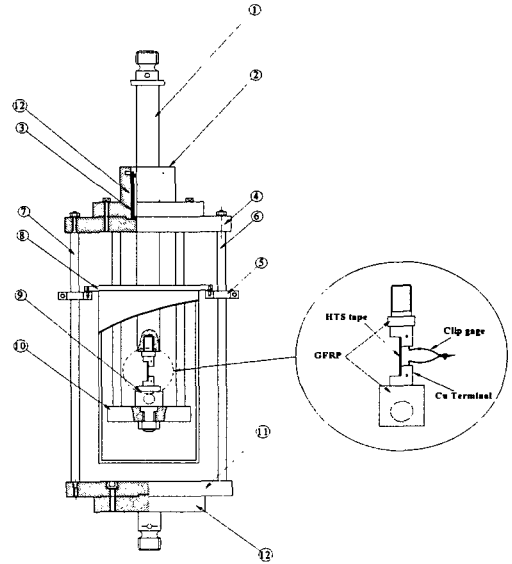
2.2. 시험방법

Bi-2223테이프의 임계전류에 미치는 변형률효과 평가를 위해, 먼저 선재의 ①인장시험, ②굽힘시험 그리고 ③굽힘-인장혼합하중하 시험을 각각 수행하였다. 먼저 인장시험은 응력 혹은 변형률의 연속적인 부가가 가능한 Instron 재료시험기를 사용하였다. Fig. 2(a)는 인장시험용 장치의 개략도를 보여주고 있다. 저온에서 선재에 걸린 변형률의 측정을 위해 상하부 시험편 고정그립 사이에 클립게이지를 설치하여 사용하였다. 한편 선재의 굽힘시험의 경우, 부하 특성상 재료시험기를 사용하는 것보다는 특정 곡률반경을 갖는 일련의 시료홀더(mandrel)에 테이프를 감아 부착하여 변형률을 부여하는 방식을 사용하였다[4]. Fig. 2(b)는 굽힘시험용 시료홀더를 사용한 초전도테이프의 굽힘시험 과정의 개략도를 보여주고 있다.

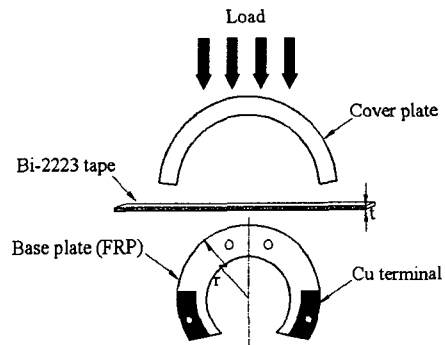
인장-굽힘 혼합 모드하에서 시험을 위해 새로 개발한 HTS 테이프의 인장-굽힘모드에서 임계전류 열화시험용 치구의 개략도를 Fig. 3에 나타내고 있다. 테이프에 변형률의 부가양식은, 특정 굽힘변형률을 부여하는 FRP제 Mandrel에 테이프를 감아서 굽힘변형을 가한 상태에서 양단을 인장하여 인장변형률을 부가하는 방식으로 되어 있다. 이때 Mandrel의 테이프 접촉 원통부에는 삼각형 홈을 내어 접촉면적의 최소화로 마찰의 영향을 줄이고자 하였다. 본 연구에서는 굽힘변형률 0.4%, 0.5%, 0.6%, 0.8%를 갖는 Mandrel을 연속적으로 교체하면서 시험을 하였다.

각 하중모드시험에서 전류단자간 게이지부 길이(gage length)는 인장의 경우는 40mm, 굽힘의 경우는 70mm로 하였다. 그 중앙부에 인장시는 20mm 간격으로, 굽힘의 경우는 30mm 간격의 전

압단자를 설치하였다. 한편 혼합 하중모드에서는, 전류단자간 거리는 150-180mm의 범위를 가졌고, 선재의 굽힘부에서 인장시 마찰에 따른 균일변형 여부를 확인하기 위하여 전압단자를 선재의 굽힘부와 직선부에 각각 설치하여 인장변형률의 증가에 따른 굽힘부에서 상호작용과 임계전류의 열화 거동을 조사하였다. 임계전류(I_c)는 4단자법을 사용하여 $1 \mu V/cm$ 전기장 기준으로 측정하였다.



(a) Apparatus for tensile test at 77K.



(b) Sample holder for easy bending test

그림 2. HTS 테이프의 인장 및 굽힘시험용 치구의 개략도.

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

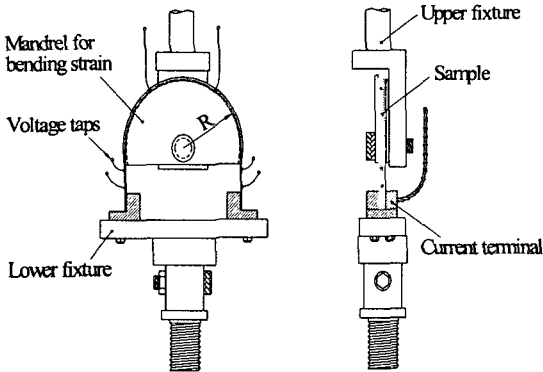


그림 3. HTS 테이프의 인장-굽힘모드에서 임계전류 열화시험용 치구의 개략도.

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

3. 결과 및 고찰

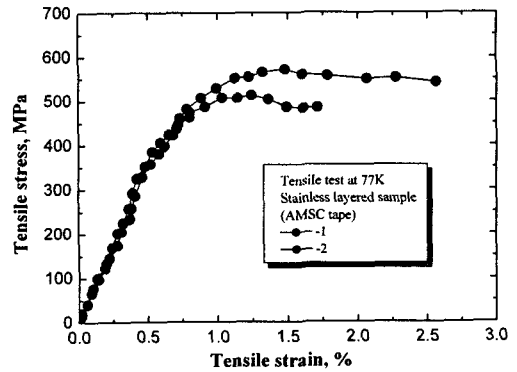
3.1. 인장시험결과

Fig. 4(a)는 스텐레스강으로 외부보강한 다심 필라멘트 Bi-2223테이프의 77K에서 인장시험 결과 얻어진 응력-변형률선도를 나타내고 있다. 이 선도로부터 마그네트와 코일 제작에 필요한 설계인자 인 영률, 항복강도, 연신율 등의 특성치를 구할 수 있고, 77K에서 영률은 약 70 GPa, 항복강도(0.2% offset)는 약 490 MPa를 나타내었다.

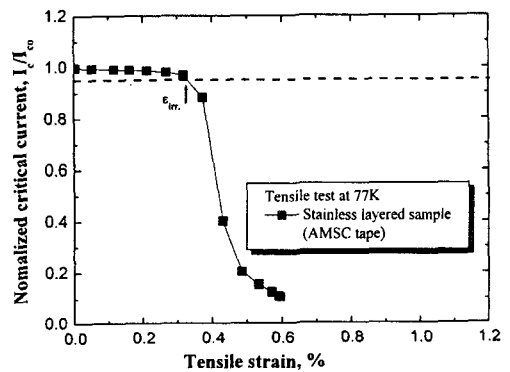
Fig. 4(b)는 측정부 길이 40mm, 전압단자간격 20mm를 갖는 단척시료(short sample)에 대한 임계전류의 인장변형률 의존성을 나타내고 있다. 전체적으로 변형률이 0.3 %를 넘어서면서 필라멘트부에 균열 도입과 더불어 임계전류의 급격한 저하를 나타내고 있다. 이러한 인장변형률 거동은 Bi-2223선재의 특성으로, $L_c/L_{co}=0.95$ 로 정의한 비가역 임계변형률, $\epsilon_{t,irr} \approx 0.33\%$ 이다. (c)는 인장응력에 대하여 임계전류의 열화거동을 나타낸 것으로, 비가역임계응력, $\sigma_{irr} = 235$ MPa이다.

3.2. 굽힘시험 결과

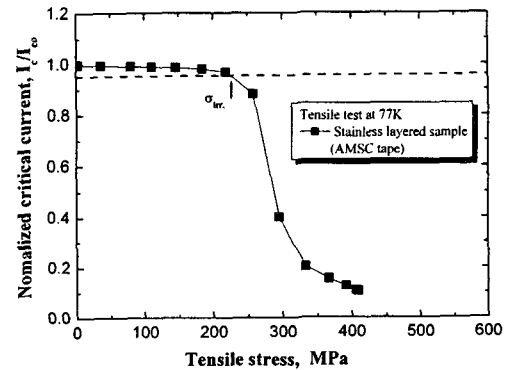
Fig. 5는 시료홀더를 연속적으로 교체하면서 테이프의 Easy bending 모드에서 상온에서 굽힘변형을 가한 후, 77K에서 측정한 임계전류의 굽힘변형을 의존성을 나타내고 있다. AMSC선재의 경우, 외부보강으로 인해 보강하지 않은 선재에 비하여 현저한 변형률특성의 개선을 나타내고 있다. 굽힘 변형시 비가역 임계변형률, $\epsilon_{b,irr} = 0.8\%$ 로 종래의 외



(a) Stress-strain curves



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



(c) $I_c/I_{co} - \sigma$ relationship

그림 4. 77K에서 인장시험 결과.

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

부보강하지 않은 Bi-2223선재에 비하여 현저한 임계변형률의 증가를 나타내었다. 또한 굽힘의 경우는 앞서 인장변형시와는 달리, 굽힘변형률이 0.8%를 증가하여도 임계전류는 비교적 서서히 저하하는 거동을 나타내었다.

따라서 혼합하중모드하 시험에서는 초기 굽힘변

형률값으로, $\epsilon_b=0.4, 0.5, 0.6$ 그리고 0.8% 를 부여한 상태에서 인장변형률을 추가하는 방식으로 임계전류의 열화거동을 파악하고자 하였다.

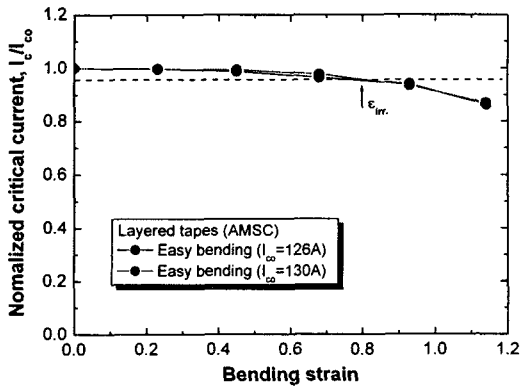


그림 5. 외부보강 Bi-2223 테이프의 I_c 에 미치는 굽힘변형률.

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

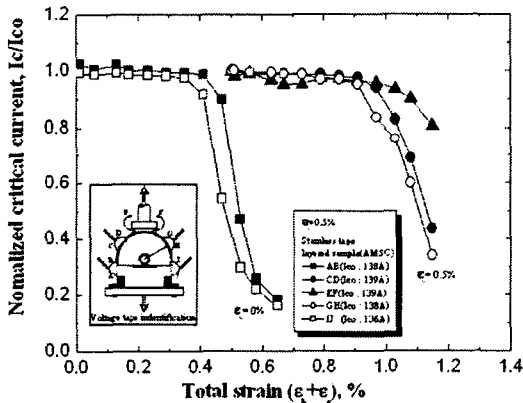


그림 6. 굽힘-인장변형률 혼합 모드하에서 임계전류의 열화거동.

Fig. 6. I_c/I_{c0} vs. total strain in mixed loading mode of bending and tension.

3.3. 굽힘-인장 혼합모드시험 결과

Fig. 6은 $\epsilon_b=0.5\%$ 인 굽힘용 시료홀더를 사용하여 상온에서 굽힘변형을 가한 후, 77K에서 인장을 가하면서 측정된 임계전류의 전체변형률 의존성을 나타내고 있다. 굽힘부와 직선부에서 열화거동에 차가 나타나, 인장변형률만 작용한 직선부 구간 AB와 IJ에서는 Fig. 4(b)와 유사한 열화거동을 나타내었다. 한편, 굽힘부 구간 CD와 GH에서는 거

의 유사한 열화거동을 나타내지만, 순수굽힘하에서 시험한 Fig. 5의 경우보다 다소 우수한 변형률특성을 나타내, 비가역 전체변형률, $\epsilon_{irr.}$ =약 0.90% 를 나타내었다. 이것은 임계전류의 열화거동이 인장변형률에 의해 크게 영향을 받는다는 것을 의미한다. 한편 굽힘용 시료홀더의 중앙부 구간 EF에서는 테이프와 홀더간 마찰로 인해 인장하중이 제대로 테이프에 전달되지 않은 관계로 1.0% 를 넘어서면서 I_c 의 열화를 나타내었다. 한편 굽힘과 인장이 동시에 작용하는 구간에서는 임계전류의 열화가 인장만 걸리는 경우보다 다소 완만하게, 굽힘시 보다는 현저하게 되는 것을 볼 수 있다. 이것은 FRP홀더로 테이프선재가 지지됨에 따라 인장시 발생하는 균열의 도입이 비교적 균일하게 일어났기 때문으로 생각된다.

4. 결론

Bi-2223 테이프에 대한 임계전류 특성에 미치는 단일 및 혼합하중 모드에서 임계전류의 열화거동을 평가하였다. 스텐레스강 보강선재는 양호한 기계적특성을 나타내었고, 임계전류의 인장변형률특성은 굽힘변형률 특성에 비하여 현저히 낮아서, 인장시 비가역 임계변형률은 $\epsilon_{b,irr.}=0.33\%$, 굽힘변형시 비가역 임계변형률, $\epsilon_{b,irr.}=0.8\%$ 로, 외부보강이 인장변형률효과에는 그다지 영향을 미치지 않았다는 것을 알 수 있다. 굽힘-인장 혼합모드에서는 중첩의 원리로 구한 전체변형률로 나타낼 수 있었고, 임계전류의 열화는 주로 인장변형률의 영향을 받는다는 것을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 차세대 초전도용용기술 개발사업단(CAST)의 지원으로 수행되었기에 지원에 감사를 드립니다.

참고 문헌

- [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).