

HTS 초전도 테이프의 기계-전기적 특성 평가기술

Evaluation Technology of Mechano-Electromagnetic Properties in HTS Superconducting Tapes for Practical Applications

신형섭*

(Hyung-Seop Shin)

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. The progress in technology achieved in the field of strain effect evaluation on the critical current of HTS tapes in various deformation modes is discussed in this study.

Key Words : Mechanical Properties, Stress/Strain Effect, Critical Current, Loading Modes, Bi-2223 tapes.

1. 서 론

Bi-기 산화물 고온 초전도체의 제작기술과 냉동공학의 지속적인 발전은 고자장 마그네트, 그리고 다양한 전력기와 같은 보다 실제적인 응용분야에 HTS선재 사용에 대한 기대를 높여 오고 있다. 이러한 초전도체를 마그네트와 전력기에 적용하게 되면, 제작, 냉각, 운전시 여러 가지 형태의 응력이나 변형률을 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. 특히, 높은 J_c 와 자장은 초전도테이프에 큰 로렌츠력을 미치게 되어 후프응력뿐만 아니라 도체의 횡방향압축응력을 발생시키게 된다. 이들 기계적 응력/변형률의 작용은 초전도특성의 저하를 초래하여, 그 특성을 이해하기 위한 초전도선재의 기계-전자기적특성 평가에 관한 연구가 필요하다.

한편 초전도 코일이나 마그넷, 모터와 같은 응용분야는 물론 초전도 케이블의 제조과정에서 초전도테이프는 장력을 가한 상태에서 굽힘을 받게 되고, 이것은 굽힘 변형뿐만 아니라 테이프 상호간에 밀착을 가져와 굽힘, 인장에 의해 횡방향 압축응력도 발생시키게 된다[3]. 그러나 마그넷이나 코일의 와인딩 또는 운전중 발생하는 횡방향 압축응력에 따른 Bi-2223 테이프의 임계전류의 열화 특성에 관해서는 아직 알려져 있지 않은 실정이다. 따라서 부과응력/변형률의 관리를 통한 초전도 코일의 적용분야 확대를 위해서는 HTS테이프의 임계전류 저하에 미치는 각 부하 형태에 따른 임계전류의 열화거동에 대한 연구가 우선 필요하다. 그 결과, 선재에 걸리는 각각의 부하 형태에서 변형률을 중첩하여 HTS테이프에 걸리는 전체 변형률 값을 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 전력기기에 응용하기 위한 PIT선재의 기계-전기적 특성의 평가라는 측면에서, 그간 안동대 연구팀에서 수행해

* : 안동대학교 기계공학부
(경북 안동시 송천동 388, Tel: 054-820-5675
E-mail : hsshin@andong.ac.kr)

은 각 변형률 모드에서 PIT선재의 기계적 특성 및 임계전류의 열화특성, 즉 변형률효과에 관한 평가 기술과 결과를 보고하고자 한다.

2. 실험방법

2.1. 시험편

초전도선재의 기계적특성 평가를 위한 일련의 실험에는 시판의 다심 Bi-2223선재가 사용되었다. 크게 나누면, (1) 산화물 복합 초전도체의 기계적 특성평가를 위한 시험법 확립을 위하여, VAMAS/TWA 16-Subgroup에서 국제라운드로빈시험(Round Robin Test, RRT)용으로 제공된 표준시료[4]와, (2) 스텐레스강 박판으로 양면을 적층 보강한 선재 (laminated wire; AMSC사제)이다. 이들 선재의 기본적인 특성을 표 1에 각각 나타내고 있다.

표 1. 시험편의 사양

Table 1. Specifications of samples tested

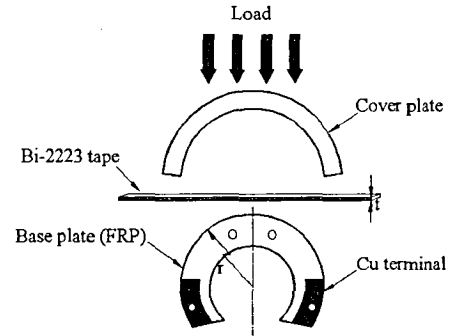
Sample	Dimension width x thick (mm ²)	I _c at 77K, SF (A)	Sheath	No. of Filament	Filament /Ag ratio
VAM-1	3.70 x 0.27	50	Ag/Ag Alloy	57	0.28
VAM-2	2.95 x 0.18	28	Ag alloy	19	0.24
VAM-3	3.14 x 0.25	42	Ag alloy	37	0.26

2.2. 시험방법

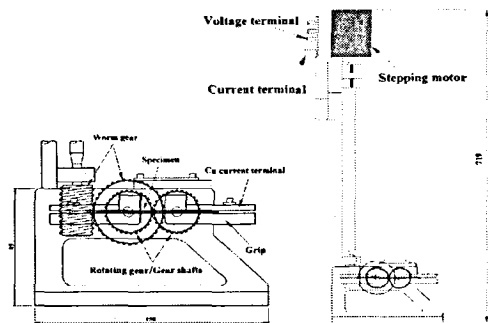
HTS PIT선재의 기계적 특성 및 임계전류의 변형률효과(strain effect) 평가를 위한 기본시험으로는 선재의 ① 인장, ② 굽힘 그리고 ③ 횡방향 압축시험을 들 수 있다. 인장과 횡방향 압축시험에는 응력 혹은 변형률의 연속적인 변화가 가능한 재료 시험기를 사용한 시험이 채택되어 오고 있다. 그러나 굽힘시험의 경우, 부하의 특성상 재료시험기 사용보다는 특정 곡률반경을 갖는 일련의 시료홀더 (mandrel)에 테이프를 감아 부착하여 변형률을 부여하는 방식이 사용되고 있고, 최근 Goldacker 등에 의해 연속적인 굽힘시험이 가능한 시험장치가 개발되어 시료홀더 사용시 예상되는 열이력 (thermal cycling)에 따른 영향을 배제할 수 있게 되었다[5].

초전도선재를 사용한 전력기기의 설계 데이터 확보를 위해서는 선재의 기본적 특성 평가시험에 덧붙여 응용측면의 혼합부하 형식에서 시험 또한

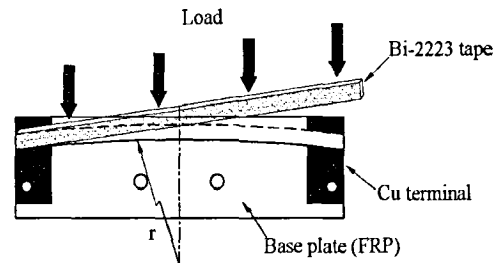
필요하다. 그 예로, 선재의 비틀림시험, 그리고 인장-굽힘 혼합 모드하 시험 등을 들 수 있다.. 이들과 각 시험에 사용된 시험용 시료홀더와 시험법에 관한 상세는 이미 전보에 보고되어 있다[6-8]. 그림 1은 폭방향으로 작용하는 굽힘을 Hard bending이라고 하고, 각 굽힘 시험용 치구를 나타내고 있다.



(a) Sample holder for easy bending test



(b) Goldacker type apparatus for continuous test in easy bending mode



(c) Sample holder for hard bending test

그림 1. HTS 테이프의 굽힘시험용 치구 개략도
Fig. 1. Illustrations of fixtures for bending test of HTS tape.

그림 2는 선재의 횡방향압축시험, 그림 3은 선재의 비틀림시험용 치구의 개략도를 각각 나타내고 있다. 한편, 본 연구에 사용된 I_c 의 변형률효과 시험에는 연속적으로 변형률을 증가시키면서 각 단계에서 I_c 를 측정하는 단일시험편(single specimen)법이 사용되었다. 대부분의 시험에서 시료의 전류 단자간 게이지부 길이(gage length)는 60~70mm, 그 중앙부에 30mm간격의 전압단자를 설치하였다. I_c 값은 4단자법을 사용하여 $1\mu V/cm$ 전기장 기준으로 측정하였다. 이때, 발생하는 전압 V 는 초전도상태에서 상전도 상태로의 천이구간에서 측정하였다. 통상 전압은 전류 I 의 함수로 나타내, 식 (2)의 관계를 갖는다.

$$V = cI^n \quad (2)$$

여기서, V 는 발생전압, I 는 부가전류, 그리고 c 는 상수 값을 나타낸다. n 값은 $0.2 \sim 5 \mu V/cm$ 영역에서

그림 2. HTS 테이프의 횡방향압축용 치구 개략도

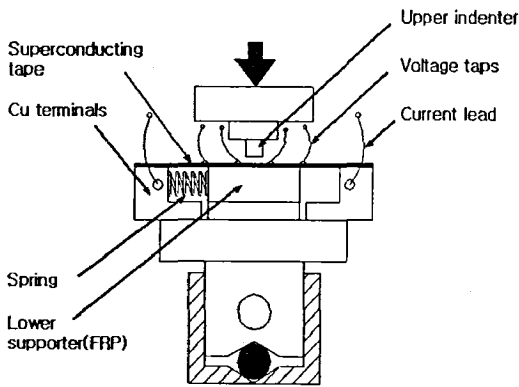


Fig. 2. Illustrations of fixture for transverse compressive test of HTS tape.

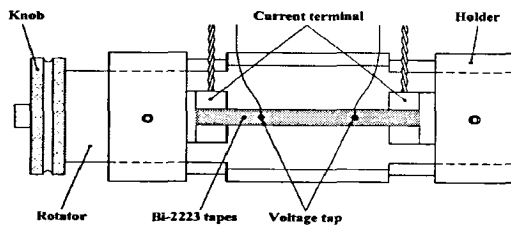


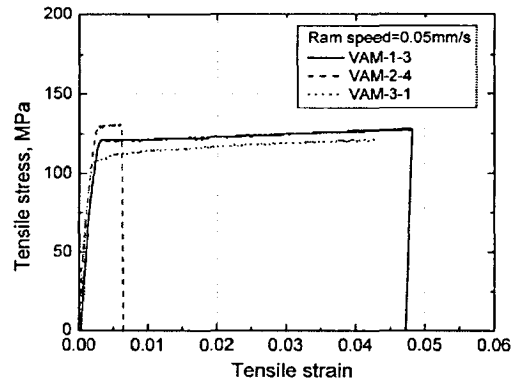
그림 3. HTS 테이프의 비틀림시험용 치구 개략도
Fig. 3. Illustrations of fixture for torsion test of HTS tape.

$\log V$ 와 $\log I$ 사이 직선구간에 대한 선형피팅으로 구하였다. 이렇게 구한 n 값의 거동은 테이프선재에서 변형률 증가에 따른 균열진전 거동의 간접적 추정을 가능케 한다.

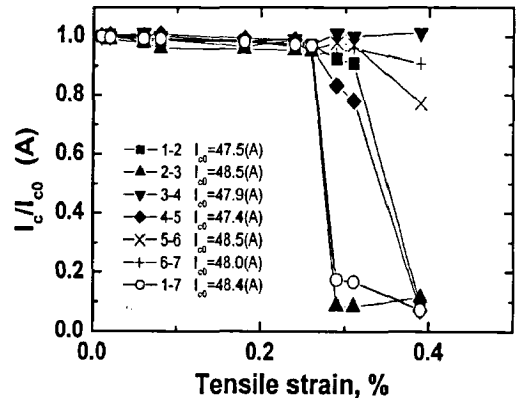
3. 결과 및 고찰

3.1. 인장시험결과

그림 4 (a)는 세 종류의 다심 필라멘트 Bi-2223 테이프의 상온 인장시험 결과 얻어진 응력-변형률 선도를 나타내고 있다. 이 선도로부터 마그네트와 코일 제작에 필요한 설계인자인 영률, 항복강도, 연신율 등의 특성치를 구할 수 있다. 그러나 HTS 선재가 복합선재인 관계로 인장시험법의 표준화를 위한 국제적 검토가 현재 이루어지고 있다[1].



(a) Stress-strain curves



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

그림 4. VAM 테이프의 인장시험 결과
Fig. 4. Results of tensile test in VAM samples

그림 4(b)는 길이 50mm의 단척시료(short sample)를 사용하여 다수 전압단자 구간을 갖는 VAM-1 선재의 임계전류에 미치는 인장변형률 의존성을 나타내고 있다. 전체적으로 변형률이 0.27 %를 넘어서면서 필라멘트부에 균열 도입과 더불어 임계전류의 급격한 저하를 나타내고 있다. 그러나 2-3, 6-7과 같은 미소 구간에서는 아직 열화가 일어나지 않은 것을 볼 수 있다. 이것은 인장시험법의 특성과 관련이 있어, 선재의 인장변형시 임계전류의 변형률효과를 평가하기 위해서는 전압단자 사이에 균열과 같은 결함이 존재하도록 하여야 한다는 것을 의미한다.

3.2. 굽힘시험 결과

그림 5는 시료홀더를 사용하여 연속적으로 홀더를 교체하면서 테이프의 Easy 및 Hard bending 모드에서 상온에서 굽힘변형을 가한 후, 77K에서 측정된 임계전류의 굽힘변형을 의존성을 나타내고 있다. 세 종류의 선재에 대하여 상온 굽힘에 따른 열응력에도 불구하고, 거의 유사한 거동을 나타내고 있다. Easy bending의 경우는 인장변형의 경우보다 양호한 변형률특성을 나타내고 있다. 한편 Hard bending의 경우는 Easy bending의 경우보다 현저한 굽힘변형률 열화거동을 볼 수 있다. 그러나 Easy bending의 경우는 그림 4 (b)에서 보인 인장변형시와는 달리, 굽힘변형률이 0.4%를 증가하여도 임계전류는 비교적 서서히 저하하는 거동을 나타내는 것을 알 수 있다.

한편 그림 6은 그림 1(b)에 보인 Goldacker식 굽힘시험기를 사용하여 BAM-1 시료에 대한 상온 굽힘과 77K에서 굽힘에 따른 굽힘시험 결과를 나타내고 있다. 그림 5에 보인 시료홀더를 사용하여 시험한 Easy bending의 결과를 병기하여 비교하였다. 이 시험법의 특징은 전류단자와 시료를 슬더링하지 않고 기계적 접촉에 의한 통전방식을 채용하고 있는 관계로, 이에 따른 I_c 의 열화거동에 미치는 그 영향 평가가 필요하다. 먼저 상온굽힘의 경우를 그림 5의 시료홀더를 사용한 경우와 비교하면 0.6%의 변형률까지 거의 같은 열화 정도를 나타내, 그림 1(a)에 보인 시료홀더에 시료의 반복치부에 따른 손상의 영향이 거의 나타나지 않았다는 것을 알 수 있다. 굽힘온도에 따른 영향을 살펴보면, 상온굽힘의 경우가 77K 굽힘의 경우보다 0.13% 정도 낮은 ϵ_{irr} 값을 나타내었다. 이것은 상온 굽힘후 냉각에 따라 시료에 발생한 열응력에 따른 손상의 발생에 기인하였다고 생각된다.

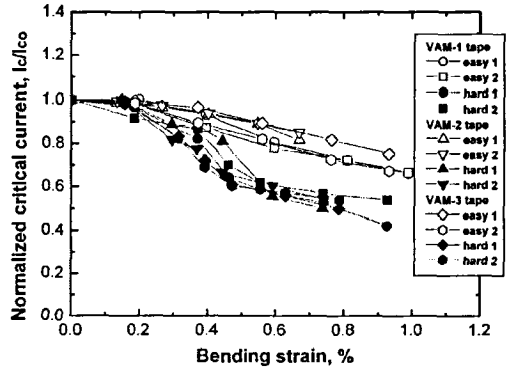


그림 5. VAM 테이프의 I_c 에 미치는 굽힘변형률
Fig. 5. I_c/I_{c0} vs. bending strain in VAM samples

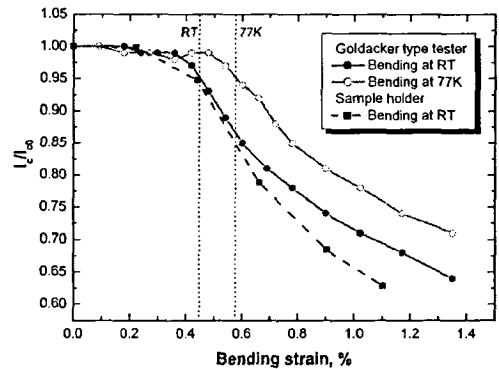


그림 6. Goldacker 식 시험기를 사용한 VAM-1 테이프의 I_c 에 미치는 굽힘변형률
Fig. 6. I_c/I_{c0} vs. bending strain in VAM-1 samples using Goldacker type testing apparatus

3.3. 횡방향압축시험 결과

그림 7은 시판(AMSC사) 선재를 사용하여 횡방향압축시험결과 얻은 I_c/I_{c0} - σ 거동을 나타내고 있다. 스테인리스강 박판(Type 304)으로 테이프 양측을 보강한 경우와 보강하지 않은 테이프선재 두 종류의 선재에 대한 압축실험 결과이다. 약 130 A부근의 높은 I_c 값을 나타내는 비하여, 외부보강을 하지 않는 경우는 전압단자 간격이 30 mm임에도 불구하고 비가역 압축응력, σ_{irr} 는 35 MPa로 낮은 값을 나타내었고, 200 MPa의 압축응력에서는 45%까지 I_c 가 저하하는 것을 볼 수 있다. 이것으로부터 Ag시-스재의 경우 Ag합금시-스재보다 횡방향 압축응력에 따른 I_c 저하가 현저하는 것을 알 수 있다.

반면 Bi-2223테이프의 양면을 스테인리스강 박판으로 보강한 경우는 거의 I_c 저하를 나타내지 않았고, 10 mm의 전압단자 구간에서 측정된 경우에서도 σ_{lim} 은 125 MPa의 큰 값을 나타내었고, 200MPa에서도 80%의 I_c 값을 유지하였다. 따라서 초전도 마그넷이나 코일에 BSCCO 테이프를 적용할 경우, 예상되는 횡방향 압축응력에 따른 임계전류의 열화 특성을 보완하기 위해서는 시-스합금의 고강도화 혹은 고강도 금속의 적층을 통한 외부보강이 필요하다는 것을 알 수 있다.

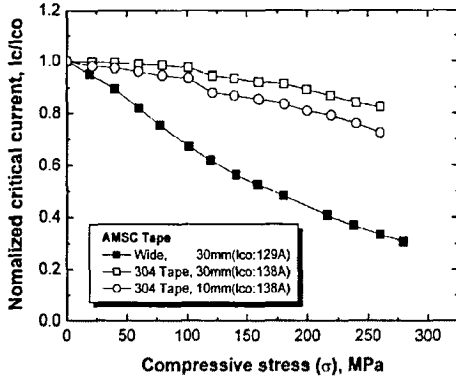


그림 7. Bi-2223 테이프의 I_c 에 미치는 횡방향 압축응력의 영향
 Fig. 7. I_c/I_{c0} - σ relationship in Bi-2223 tapes (ASMC tapes)

3-4. 비틀림시험 결과

그림 8은 VAM선재의 비틀림 시험을 통해 얻어진 임계전류와 비틀림각 사이의 관계를 나타낸 것이다. 모든 선재에 있어서, I_c 는 150°의 비틀림각까지는 거의 I_c 의 저하를 나타내지 않았으며, 이후 비틀림 각이 증가함에 따라 임계전류는 서서히 저하하는 거동을 나타낸 것을 알 수 있었다. 필라멘트수가 많은 선재일수록 비틀림에 의한 임계전류의 열화거동이 현저하게 나타내었다. 그 이유는 필라멘트수가 많아질수록 기계적 강도를 증가시키기 위해 고려된 시스템이 차지하는 체적은 그만큼 줄어들게 되며, 또 초전도 필라멘트의 크기 또한 상대적으로 줄어들게 되면서, 동일한 변형률에 대하여 필라멘트수가 많은 경우가 더 빨리 균열 발생 및 전전이 발생하는 것으로 고려된다.

편 비틀림각을 사용하면 전단 변형률을 $\epsilon_t = t\theta/L$ 로 표현되는데, 그림 9에서 볼 수 있듯이, 임계전류는 세종류의 선재간에 전단 변형률에 따른 차를 나타내지 않고 거의 동일한 선도 상에 놓이는 것을 볼

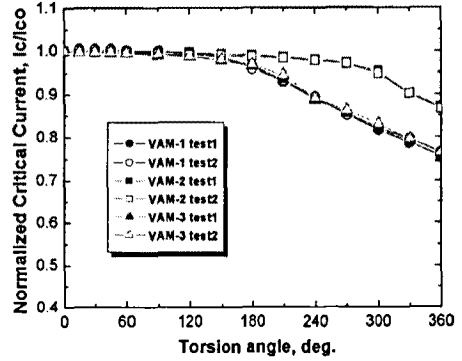


그림 8. Bi-2223테이프의 비틀림 시험에 의한 임계전류와 비틀림 각 사이의 관계
 Fig. 8. I_c/I_{c0} -torsion angle relation during torsion test of Bi-2223 tapes.

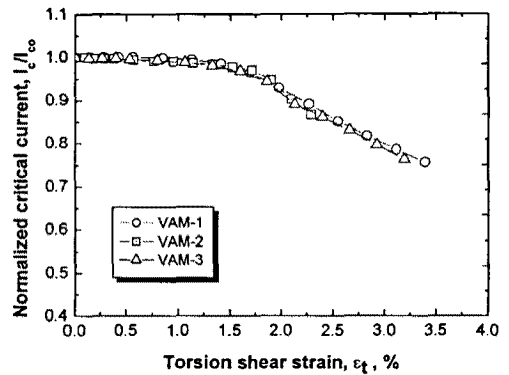


그림 9. Bi-2223 테이프의 I_c 에 미치는 비틀림변형률의 영향
 Fig. 9. I_c/I_{c0} - ϵ_t relationship in Bi-2223 tapes

수 있다. 이때 $I_c/I_{c0}=0.95$ 에 해당하는 임계전단 변형률 $\epsilon_{t,lim}=1.84\%$ 이다. 이 값은 앞서 인장이나 굽힘 변형하에서 얻어진 임계변형률값보다 현저히 높은 값이다. 이것은 HTS테이프의 비틀림 동안 야기된 변형률은 다른 부하모드에서 발생한 변형률에 비하여 그 영향이 그다지 크지 않음을 알 수 있다. 따라서 HTS 테이프를 사용하여 코일이나 케이블을 만드는 동안, 비틀림 변형을 받게 되지만, Bi-2223테이프의 임계전류저하에는 그다지 영향을 미치지 않았다는 것을 알 수 있다.

4. 결론 및 향후 과제

BSCCO HTS실용 선재에 대한 임계전류특성에 미치는 기계적 변형 및 변형률효과에 관한 연구는 다양한 하중형태에 대한 단일 하중모드에서 전기-기계적특성의 평가기술은 거의 확립되어 있으나, 실용 사용조건을 고려한 혼합하중 모드에서의 실용설계데이터의 확보를 위한 노력이 전력기기의 상용화를 위한 신뢰성 및 안전성확보 측면에서 최근 활발히 진행되어 오고 있다.

HTS 초전도 선재의 기계-전기적특성 평가와 관련한 향후 연구분야로는 크게 나누어서, (1) PIT선재의 외부보강재를 포함하는 선재의 기계적특성 평가 및 설계데이터 확보를 위한 연구: 외부보강재의 임계전류저하에 미치는 영향, 신뢰성확보를 내구특성 평가 기술 개발, (2) Coated Conductor에서 Substrate의 배향성 및 기계적 특성, 임계전류의 strain effect를 고려한 설계 및 평가기술 개발이 향후 과제로 생각된다.

후 기

본 연구는 차세대 초전도응용기술 개발사업단(CAST)의 지원으로 수행되었기에 지원에 감사드립니다. 아울러 실험을 도와 준 안동대학교 대학원 최수용, 김기현, 김병수, 최호연군에게도 감사드립니다.

참고문헌

- [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. Dietrich, R. M. Scanlan, T. Hasegawa, Y. Aoki, R. S. Sokolowski and L. R. Motowidlo, Critical current variation as a function of transverse stress of Bi-2212 Rutherford cables, 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, A comparison of strain effect on critical current in Bi-2223 superconducting tapes in different bending modes, IEEE Trans. Applied Supercond., Vol. 13 (2003). to be published.
- [7] H. S. Shin, S. Y. Choi, H. S. Ha, D. W. Ha and S. S. Oh, Ic degradation behavior in Bi-2223 superconducting tapes under torsional deformation, Physica C, Vol. 383 (2003) in press.
- [8] 신형섭, 김병수, 오상수, 하동우, 하홍수, Bi-2223 초전도테이프의 임계전류 열화특성에 미치는 횡방향 압축응력의 영향, 한국초전도저온 공학회 2003년학술대회논문집. pp.101-104 (2003).