

Bi-2223 산화물 복합 초전도 테이프의 기계적 특성 평가

Evaluation of Mechanical Properties in Bi-2223 Composite Superconducting Tapes

신형섭*, 최수용**

Hyung-Seop Shin* and Su-Yong Choi**

Abstract : For the practical use of a superconducting wire to magnet application, it is important to assess the Young modulus and other mechanical properties of HTS tapes. In order to establish a test method of mechanical properties for oxide composite superconductors, tensile tests of Bi-2223 multi-filamentary tapes were carried out at room temperature, as an activity of the International round robin test proposed by the committee of VAMAS/TWA 16-Subgroup. The tapes consisting of multi-filamentary showed a three stage tensile behavior. At the initial stage of the stress-strain curve, the elastic deformation existed in a quite narrow strain region. But the plastic deformation was observed in a wide strain region due to the plastic flow of the Ag alloy matrix. The results of RRT were also reported and discussed.

Key Words : Bi-2223 multi-filamentary tape, tensile test, stress-strain curve, mechanical properties

1. 서 론

고온 초전도체(HTS)는 높은 임계온도와 임계전류, 그리고 높은 상부임계현은 나타내기 때문에 극자장 마그네트용으로 사용이 기대되고 있다. 최근의 선재가공 기술과 냉동기 공학분야의 진보는 이들의 실용화 가능성을 한층 증대시켜 주었다.

전도체를 마그네트에 적용시는 여러가지 형태의 하중이나 응력이 작용하여 변형을 일으키게 된다. 따라서 마그네트 설계를 위해서는 산화물계 고온 초전도선재의 기계적 특성평가와 더불어 강화방안의 강구가 필요하다[1]. 특히 고온 초전도 재료의 실제적인 응용을 위해서는 선재의 영률 및 변형에 따른 I_c 저하거동의 평가가 중요하고 필요하다[1,2].

산화물계 초전체는 화합물계와 달리 기계적 손상이 발생하게 되면 임계전류 등 초전도특성의 비가역적 저하를 나타내게 된다[3]. 이러한 측면에서 HTS선재의 기계적특성 및 임계전류의 열화 측정 표준 작성을

위한 연구가 활발하여 진행되어 오고 있다[4]. 산화물복합 초전도체의 기계적 특성 평가를 위한 시험법을 확립하기 위하여, VAMAS/TWA 16-Subgroup에서는 국제 라운드로빈시험(Round Robin Test: RRT)을 제안하였고, 그 첫 대상으로 다심 필라멘트를 갖는 세 종류의 Bi-2223 테이프에 대한 상온 인장시험으로 하였다.

본 연구에서는 Bi-2223 다심 테이프의 상온에서 인장시험을 수행하였다. 그 결과를 해석하고, 기계적 특성의 정확한 측정을 위한 시험법 도출을 위해 국제RRT결과와 함께 조사결과에 대하여 언급하고자 하였다.

2. 시험과정

2.1. 시료

상온 인장시험에 사용된 시료는 시판의 다심 필라멘트 Bi-2223 초전도 테이프이다. 이들은 VAMAS 프로그램 위한 표준시료로서 제공되었다. 이들의 기본적인 특성치를 Table 1에 나타내었다. 시스(sheath)재로는 Ag합금을 사용하였다. 시료의 폭과 치수는 마이크로미터를 사용하여 $\pm 0.01\text{mm}$ 의 정도로 측정하였다.

2.2. 상온 인장시험

인장시험은 MTS 유압시험기(모델명:312.21, 로더셀 용량: 2.5 kN)를 사용하여 수행하였다. 이때 시료의 길이는 115 mm이고, 고정블록간 하중을 받는 측정부의 길이는 77 mm로 하였다.

이때 시료에 손상을 주지 않기 위해서는 시료의 장착방법(척킹)이 고려되어야 할 중요한 인자의 하나이다. 본 연구에서는 시료양단에 800번 샌드페이퍼를 덴 후 W20xL12.7 mm의 크기를 갖는 클램핑 블록을 사용하여 시료를 고정하였다. 그 결과 인장시험 동안 척킹부에서 미끄럼은 발생하지 않았다.

2.3. 변형률 측정

한편 인장하중의 부하에 따라 시료에 발생한 변형률 측정은 상용의 신장계(MTS Extensometer; gage length=25.4mm)를 사용하였다. 그림 1은 시료에 신장계를 설치한 후의 모습을 나타내고 있다. 이때, 신장계의 자중이 시료 선재에 가해지지 않도록 중량을 지지할 수 있는 지지대프레임을 설치하여 신장계를 고정하였다. 인장시험시의 램속도는 0.05 mm/s로 하였다.

3. 실험결과

3.1. 인장시험 결과

* 정 회 원 : 안동대 기계공학부

** 비 회 원 : 안동대 대학원 기계공학과 석사과정

원고접수 : 2001년 10월 29일

심사완료 : 2001년 11월 09일

표 1. 시험에 사용된 시료의 사양

Table 1. Specification of samples tested.

Sample	Dimension width x thick (mm ²)	Critical Current at 77K, SF (A)	Sheath	Filament No.	Manufacturer
VAM-1	3.7 x 0.27	50	Ag/Ag Alloy	57	Vaccum Schmelz
VAM-2	2.95 x 0.182	28	Ag Alloy	19	NST
VAM-3	3.14 x 0.254	42	Ag Alloy	37	NST

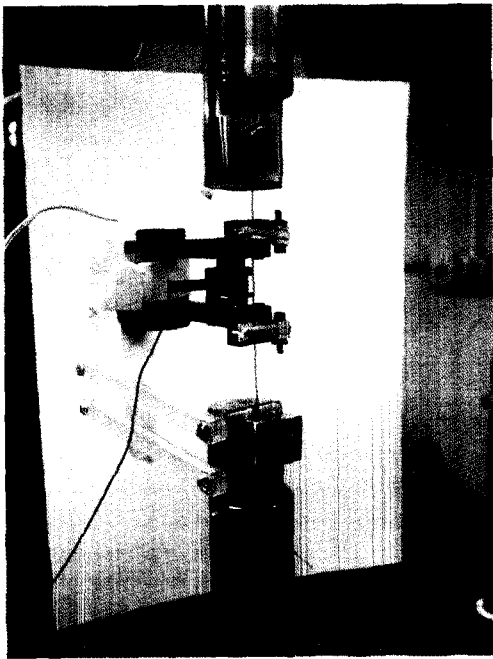


그림 1. 테이프의 인장시험을 위한 신장계 설치 광경

Fig. 1. View of extensometer installation for tensile test of tapes.

시판의 세 종류 다심 필라멘트 Bi-2223 산화물초전도체 테이프를 사용하여 상온에서 인장시험 결과 얻어진 응력-변형률선도를 Fig. 2에 나타내었다. 탄성역에서 응력은 변형률에 비례하여 선형적으로 증가하였다. 항복이 일어난 후, 응력 증가율은 서서히 감소하였고, 변형률의 증가와 더불어 포화하는 경향을 나타내었다. 그러나 3종류의 테이프 모두에서 시험 도중 불안정한 응력의 저하와 같은 거동은 전혀 나타나지 않았다.

시험은 각각의 조건에서 5회 실시하였다. 그 결과를 Table 2에 요약하였다. 대부분의 경우 파단은 척킹부로부터 떨어진 곳에서 일어났다. 신장계는 통상적인 재료 시험용을 사용하였다. 이때 자중 지지대를 설치하여 시료에는 여분의 하중이 가해지지 않게 하였다. 또한 나이프 에지(knife edge) 부에 마스킹 테이프를 대어 신장계 체결시 시험편에 손상이 일어나지 않게 하였다. 그러나 실험시 신장계 부착에서 미끄럼은 전혀 일어나지 않았다.

인장시험에서는 변형률구간에 따라서 응력-변형률선도의 기울기가 달라서, 영률을 복측(inspection)으로 직선부 기울기로부터 구하기가 쉽지 않았다. 따라서 응

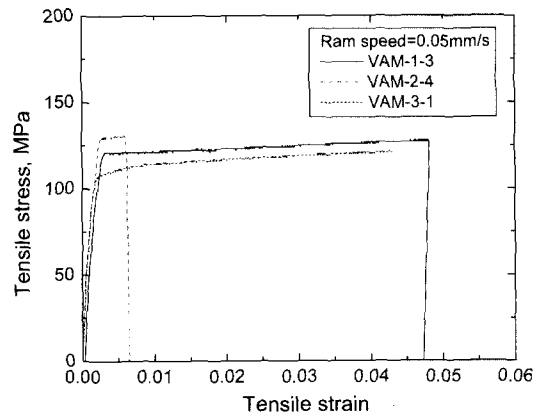


그림 2 응력-변형률 선도

Fig. 2. Stress-strain curves.

력범위에 따라서 탄성계수를 아래의 4가지로 정의하였다. E1 = 0. E1 : 0점을 지나면서 70 MPa까지 곡선의 선형피팅으로 구한 계수, E2 : 0-70 MPa사이에서 선형회귀법으로 구한 계수, E3 : 0-135 MPa 사이에서 선형회귀법으로 구한 계수, 그리고 E4 : 제 1 구간에서 선형 피팅하여 구한 계수이다. 이들 값들은 동일한 시험에 대하여도 상당한 차를 나타냄을 알 수가 있어서, 영률의 보다 정확한 측정을 위한 노력이 필요하다.

한편, 0.2%내력($\sigma_{p0.2}$)은 곡선상에서 0.2%의 변형률 을셋 선을 그어 구하였다. 테이프 선재의 인장강도(σ_m)는 최대하중에 해당하는 응력값이고, 파단 연실율은 하중(응력)의 급격한 저하시(A)에 해당하는 변형률값이다. 항복응력과 인장응력 값들은 비교적 작은 오차를 갖는데 비하여, 파단 연실율은 큰 오차를 나타내는 것을 알 수 있다.

3.2. 인장시험 결과 해석

실험적으로 얻어진 응력-변형률 선도로부터 탄성역의 범위를 명확히 하기 위하여, 응력선도를 변형률로 미분하였다. Fig. 3은 VAM 2-3 테이프에서 응력-변형률선도의 초기부분에서 $d\sigma/d\epsilon$ 의 변형률에 따른 변화를 나타내고 있다. 그 기울기를 보면, 초기의 매우 좁은 변형률역에서 최고 값을 나타낸 후, 변형률의 증가와 더불어 점차적으로 저하하는 거동을 볼 수 있다. 초기의 이들 탄성변형역에서 기울기는 다소 큰 변동을 나타내었지만 평균값의 변화는 크지 않았다. 그 이후 기울기는 감소하기 시작하였다. 이때 응력값은 30MPa 이었다. 여기까지가 제 1 단계에 해당하며, 진탄성영역 이 σ_{min} 까지 임을 의미한다. 초기의 거시

표 2. 인장시험 결과

Table 2. Results of tensile test.

Sample	Cross Section (mm ²)	E (GPa)				$\sigma_{p0.2}$ (MPa)	σ_m (MPa)	A (%)
		E1	E2	E3	E4			
VAM-1-1	0.949	56.5	83.3	57.7	46.4	108.3	113.5	3.18
VAM-1-2	0.949	47.9	79	62.3	170.5	125.5	132.7	4.44
VAM-1-3	0.949	50.7	70.2	54.6	137.9	120.9	127.4	4.82
VAM-1-4	0.952	111.1	90.6	63.9	86.3	121.0	128.4	4.95
VAM-1-5	0.946	79.6	71.9	59.3	286.8	121.2	129.6	4.68
VAM-2-3	0.554	53.8	67.4	56.7	65	132.2	135.4	2.09
VAM-2-4	0.545	91.6	82.0	62.7	*	129.4	129.9	0.62
VAM-2-5	0.560	51.5	61.3	50.5	*	117.4	118.6	0.47
VAM-2-6	0.554	68.2	75.1	56.5	*	120.1	121.1	0.27
VAM-2-7	0.554	50.7	72.4	58.3	*	129.6	132.5	0.51
VAM-3-1	0.815	83.9	78.2	75.2	*	110.0	121.2	4.30
VAM-3-2	0.820	56.5	78.2	64.8	129.6	124.9	135.7	3.89
VAM-3-3	0.814	56.0	77.2	63.9	82.2	125.9	130.1	3.98
VAM-3-4	0.797	69.5	69.5	57.6	*	112.3	125.6	5.25
VAM-3-5	0.797	84.0	84.0	70.5	25.7	128.9	142.9	4.96

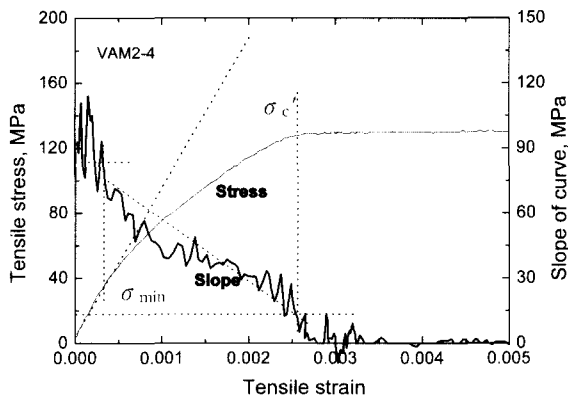


그림 3. VAM 2-4테이프에서 응력과 $d\sigma/d\epsilon$ 의 변형률 의존성

Fig. 3. Strain dependence of stress and $d\sigma/d\epsilon$ for tape VAM 2-4.

적인 파괴응력 σ_c 는 그림 2에서는 명백하게 나타나지 않았지만, 그림 3에서 기울기의 변화를 보면 그것은 $(d\sigma/d\epsilon)$ 에서 크게 감소하는 것을 나타내었다. 따라서 이 특정응력 σ_c 를 초기의 거시적 파괴응력으로 규정하는 것이 타당하다고 하겠다. 이러한 기울기의 거동은 본 연구에서 시험한 모든 경우에 동일하게 나타나지 않았고, 다만 변형률의 증가와 더불어 기울기가 점차적으로 감소하여 일정한 값에 이르는 경우가 있었다. 따라서 본 연구의 결과로부터, 제 2 단계의 변형은 특정응력, σ_c 까지로 제한됨을 알 수 있다. 이후는 제 3 단계에 해당하게 된다. Osamura 등의 단심체에 대한 관찰결과로부터[5], 다심체의 경우에도 미

소균열이 σ_{min} 에 해당하는 응력에서 생성되기 시작하여 σ_c 의 응력까지 균열밀도의 증가를 가져온다는 것을 알 수 있다. 그 후 $(d\sigma/d\epsilon)$ 을 넘는 변형률 레벨에서 이들 미소균열은 다심 필라멘트에 거시적인 파단을 초래하게 된다[5]. 이것이 기계적 변형에 의한 임계전류의 저하를 가져오는 원인으로 작용한다는 것을 알 수 있다.

3.3. 다심 Bi-2223 테이프에 대한 상온 인장 RRT 결과

RRT시험은 8개의 기관에서 수행되었고[4], 보고된 특성치 중 탄성계수, 항복강도, 인장강도, 파단연신율에 대한 결과를 Table 3에 정리하였다. 여기서, 영률(Elastic constant, E)은 목록으로 응력-변형률선도의 초기기울기로부터 구한 값이다. 0.2% 내력(0.2% proof strength, $\sigma_{p0.2}$)은 0.2% 윗셋라인을 그어 만나는 응력값을 취하였다. 인장강도(Tensile strength, σ_m)는 부하최대하중으로부터 구하였다. 파단연신율(percentage elongation to fracture, A)은 하중의 급격한 저하에 해당하는 변형률 값을 나타낸다. 여기서 COV는 표준편차를 평균값으로 나눈 값인데, 통상 표준화를 위해서는 5%미만의 작은 값이 되어야 한다. 따라서 각 그룹에 의해 제한 없이 수행된 1차 측정결과, 항복응력 및 인장강도는 이러한 수준을 만족하는데 비하여, 영률과 파단연신율은 만족하지 못하였다.

일반적으로 산화물초전도체 테이프는 취성의 산화물 전도체층과 연성의 금속기지로 구성되어 있기 때문에 공칭 영률을 구하는 것은 쉽지 않다. 왜냐하면 진 탄성역 범위가 매우 좁거나 원칙상 존재하지 않기 때문이다. 따라서 이러한 산화물에서 초기기울기(영률)를 구하기 위한 방법으로 함수 $k(A-A_0)^n$ 의 컵피팅법, 제하/재부하법, 일차미분법 등을 생각할 수 있다. 일

표 3. 제1차 RRT 결과의 요약

Table 3. Summary of first RRT

Sample		E (GPa)	Rp,0.2 (MPa)	Rm (MPa)	A (%)
VAM-1	Average	59.8 ±12.6	117.1 ±4.5	120.3 ±5.4	3.5 ±0.8
	COV(%)	21.0	3.8	4.4	22.8
VAM-2	Average	62.1 ±12.2	126.8 ±5.3	127.9 ±5.3	1.3 ±0.4
	COV(%)	19.6	4.1	4.1	30.7
VAM-3	Average	63.2 ±10.8	122.8 ±3.2	132.3 ±4.9	4.2 ±0.8
	COV(%)	17.0	2.6	3.7	19.0

차미분법이 금번에 제안되었고, 앞 절에서도 이것을 사용한 고찰이 이루어졌다. Fig. 3에 보인 바와 같이, $d\sigma/d\varepsilon - \varepsilon$ 곡선은 세가지 방식으로 구분할 수 있다. (1) 일차미분값이 단순 감소하는 경우, (2) 일차미분값이 초기의 작은 변형률역에서 거의 일정한 값을 유지한 후 감소하는 경우, (3) 최대를 나타내는 경우로 나타낼 수 있다. (2)와 (3)의 경우의 곡선으로부터 $d\sigma/d\varepsilon$ 의 최대치를 구할 수가 있다. 그러나 (1)의 경우는 어떤 합리적인 값도 구하기가 어렵다. 영률측정과 관련하여 다음번 시험에서는 $\sigma - \varepsilon$ 선도의 최대기울기를 영률로 하는 것을 포함한 개선된 측정법의 개발이 요구된다.

4. 결 론

다심 Bi-2223산화물 복합 초전도 테이프의 상온에서 인장시험을 통해 얻어진 결과를 요약하면 아래와 같다.

(1) 지지대를 갖춘 상용의 신장계를 사용한 결과, 산화물 고온 초전도 테이프에 대한 인장 응력-변형률 선도를 구할 수 있었다.

(2) 다심 Bi-2223 테이프의 인장시험결과 얻어진 응력-변형률선도는 3 단계 거동을 나타내었다. 초기탄성역은 매우 좁고, 이후 2 단계는 특정응력 σ_c 까지 비교적 넓은 영역을 나타내었다. 이것은 Ag함금 시스재의 도입에 따른 항복응력의 증대에 기인하였다.

(3) 1차 RRT를 통하여 인장 및 항복강도는 표준화에 필요한 오차 수준을 만족하였으나, 영률 및 파단연신율은 최대 17%를 넘는 분산을 나타내었다. 향후 개선된 측정법의 개발을 통한 시험법의 확립이 필요함을 알았다.

후 기

본 연구에 사용된 시료는 VAMAS/TWA-16위원회로부터 제공되었습니다. 또한 본 연구의 일부는 차세대 초전도응용기술 개발사업단(CAST)의 "초전도 케이블용 고강도 고온초전도 선재" 개발과제의 위탁연구과제로 수행되었기에 지원에 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

- [1] 신형섭, K. Katagiri, Bi-2212 초전도 테이프에서 임계전류의 응력/변형률 특성에 미치는 외부강화의 영향, 한국초전도 저온공학회논문지, 3권 1호, pp. 6-10 (2001).
- [2] H. S. Shin and K. Katagiri, Influence of Stress/Strain on Transport Critical Current Measurement for HTSC, in Advances in Superconductivity XI, edited by N. Koshizuka and S. Tajima (Springer-Verlag, Tokyo, 1999) pp. 1479-1484.
- [3] B. ten Haken and H. ten Kate, Compressive and Tensile Axial Strain Reduced Critical Currents in Bi-2212 Conductors, IEEE Trans., Vol. 5, pp.1298-1301, 1995
- [4] For example: Proc. of Int. Workshop on Mechano-Electrical Property of Composite Superconductors, Ed. K. Osamura, Kobe, Japan, (2001).
- [5] K. Osamura and M. Sugano, Mechanical Properties of Powder-in-Tube Processed Mono-and Multi-Filamentary Bi-2223 tapes, Physica C, 357, pp. 1128-1133 (2001).

저 자 소 개



신형섭(申亨燮)

1959년 03월 27일생, 1981년 경북대 공대 기계공학과 졸업, 1991년 토호쿠 대학 대학원 기계공학과 졸업(공학박사), 현재 안동대학교 공과대학 기계공학부 부교수



최수용(崔秀鎔)

1974년생, 1997년 안동대학교 기계공학과 졸업, 현재 안동대학교 대학원 기계공학과 석사과정 재학 중