

산화물 복합초전도체(Bi-2223)의 기계적특성 평가를 위한 라운드로빈 시험 결과

신형섭
안동대학교 공과대학 기계공학부

Results of the First Round-Robin-Test for Evaluation of Mechanical Properties in Bi-2223 Composite Superconductors

Hyung-Seop Shin
Department of Mechanical Engineering, Andong National University,
388 Songchun-dong, Andong, Kyungbuk, 760-749 Korea

e-mail: hsshin@andong.ac.k

Abstract - In the practical sense, it is important to assess the Young modulus and the degradation of I_c due to mechanical deformation in HTS tapes for designing superconducting magnets. In order to establish a test method of mechanical properties in oxide composite superconductors, the committee of VAMAS/TWA 16-Subgroup proposed an international round robin test. The first effort has been focused on the multifilamentary Bi-2223 tapes. Eight groups participated in the RRT activity and each group carried out the tensile test by their own professional technique to three kinds of Bi-2223 tapes. The experimental details were reported and discussed for your information.

1. 서 론

고온 초전도체(HTS)는 높은 임계온도와 임계전류, 그리고 높은 상부임계역을 나타내기 때문에 고자장 마그네트 용으로 사용이 기대되고 있다. 최근의 선재가공기술과 냉동기 공학분야의

진보는 이들의 실용화 가능성을 한층 증대시켜주었다.

전도체를 마그네트에 적용시는 여러가지 형태의 하중이나 응력이 작용하여 변형을 일으키게 된다. 따라서 마그네트 설계를 위해서는 산화물계 초전도선재의 기계적 특성평가가 필요하다. 특히 실제적인 응용을 위해서는 선재의 영률 및 I_c 저하거동의 평가가 중요하고 필요하다.

특히 산화물계 초전체는 화합물계와 달리 기계적 손상이 발생하게 되면 임계전류 등 초전도특성의 비가역적 저하를 나타내게 된다. 이러한 측면에서 HTS선재의 기계적특성 및 임계전류의 열화 측정 표준 작성을 위한 연구가 활발하여 진행되어 오고 있다. 현재 IEC TC 90 WG5와 VAMAS TMA 16에서 HTS의 기계적특성 평가 및 임계전류에 미치는 변형률효과 측정과 관련된 국제 RRT를 통한 시험법 제정을 위한 프로그램이 진행되고 있어서, 그와 관련된 활동의 일환을 보고하고자 한다.

산화물복합 초전도체의 기계적 특성 평가를 위한 시험법을 확립하기 위하여, VAMAS/TWA 16-Subgroup(Chairperson: Prof. Osamura, Kyoto Univ.)에서는 국제 라운드로빈시험(Round Robin Test: RRT)을 제안하였고, 그 첫 대상으로 다심 필라멘트를 갖는 세 종류의

Table 1 Specification of samples tested.

Sample	Dimension width x thick (mm ²)	Critical Current at 77K, SF (A)	Matrix	Filament No.	Manufacture (Specification)
VAM1	3.7 x 0.27	50	Ag/Ag Alloy	57	Vaccumschmertz (HTS 55-2.3, VAC)
VAM2	2.95 x 0.182	28	Ag Alloy	19	NST (Zerome Hercules, NST1)
VAM3	3.14 x 0.254	42	Ag Alloy	37	NST (Zerome Hercules, NST2)

Bi-2223 테이프에 대한 인장시험으로 하였다. 본연구보고에서는 그간 안동대를 포함한 여덟 개의 국제 기관 및 그룹에서 수행한 산화물초전도 테이프의 첫 번째 상온 인장시험 RRT결과를 보고하고, 표준 시험법 도출을 위한 과제들에 대하여 언급하고자 하였다.

2. 시험과정

2.1 시료

사용된 시료는 시판의 다심 필라멘트 Bi-2223테이프이고, 그 기본적인 특성치를 Table 1에 나타내었다. 시료의 폭과 치수는 마이크로미터를 사용하여 $\pm 0.01\text{mm}$ 의 정도로 측정하였다.

2.2 인장시험

각 그룹에서 사용한 시험기를 Table 2에 요약하였다. 특히 시험편 장착방법(척킹)은 본 RRT에서 고려해야 할 중요한 인자의 하나이다. 각 그룹에서 사용한 장착방법의 특징을 살펴보면,

그룹 A : 먼저 시료의 굽힘을 막기 위하여 수평으로 놓여진 시료홀더에 부착한 후 시료홀더를 시험기에 수직으로 설치하였다.

그룹 B : 너덜링한 판상 척에 샌드페이퍼를 시료의 장착부위에 대고 순간접착제를 사용하여 접착처리하여 고정하였다.

그룹 C : G10재로 된 프레임에 시료를 Cu-Be조각을 사용하여 장착하였다.

그룹 D : 두 개의 알루미늄 평행판 척사이에 시료를 두고, 스크루우방식으로 시료를 조였다.

그룹 E : 뿔납(Pb-Sn)을 사용하여 클램핑 블록에 납땜하였다. 이때 클램핑 블록의 크기는 ${}^W30 \times {}^L65\text{mm}$ 이다.

그룹 F : 시료양단에 800번 샌드페이퍼를 댄 후 ${}^W20 \times {}^L12.7\text{mm}$ 의 크기를 갖는 클램핑 블록을 사용하여 시료를 고정하였다.

그룹 G : 자기 체결식 그룹을 사용하였다.

그룹 H : 쇠기형상의 척을 사용하였다.

2.3 변형률 측정

시료의 변형률 측정은 여러 방식으로 이루어졌고, 그 상세는 아래와 같다.

그룹 A : LVDT를 사용하여 시료, 시료홀더 그리고 인장축의 변형률을 측정한 후, 강성을 고려한 컴플라이언스법으로 신장량을 측정하였다.

그룹 B : Extensometer를 사용하였다.

그룹 C : 신장량의 변화를 측정한 후, 컴플라이언스법으로 시료의 신장량을 구하였다.

그룹 D : 두 개의 Extensometer를 사용하였다.

그룹 E : 비접촉식 Extensometer를 사용하였다.

그룹 F : Extensometer를 사용하였다. 이때, 신장계의 자중이 선재에 가해지지 않도록 중량을 지지할 수 있는 지지대를 설치하여 신장계를 고정하였다.

그룹 G와 H : 명확하지 않음

시료의 전장은 Table 3에 나타난 바와 같이 40에서 120mm로 다양하였고, 척간 간격은 30-100mm이었다. 각 그룹에서 사용한 램속도는 0.05-0.0017mm/s로 최대 25배에 달하였다.

Table 3. Test conditions employed.

Group	Sample length (mm)	Distance between chucks (mm)	Ram speed (mm/s)
A	70	40	0.01
B	70	45	0.011
C	40	30	0.002 - 0.005
D	100	-	0.0083
E	60/120	-	0.0025
F	115	77	0.05
G		100	0.0017 - 0.01
H	100	50	0.0033 - 0.0083

Table 2. Specification of measuring apparatus used by individual group.

Group	Manufacturer and model	Load cell capacity (kN)	Model	Strain measurement capacity (kN)	Measurement method	Manufacturer and model	Gauge length (mm)
A	Instron 5566	10	Instron	0.5	Compliance	LVDT	
B	NMB TCM-500	5	NMB TT3	5(0.25)	Extensometer	MTS632.29F-31	5
C					Compliance		
D	MTS-servo hydraulic	50	MTS	5 (0.5 - 0.073)	Double extensometer	FZK	
E	Shimadzu EHF-FB			2	Extensometer (non-contact)	Shimadzu DVE-200	20/80
F	MTS 312.21			0.2	Eextensometer	MTS632.31E-24	25.4
G	Lloyd PLC L6000R	50	NLC1000N	1			
H	Shimadzu DSS-10T			5	Eextensometer	FZK	15

3. 실험결과

3. 1 인장시험 결과

세 종류의 산화물초전도체 테이프를 사용하여 본 그룹에서 인장시험결과 얻어진 전형적인 응력-변형률선도를 Fig. 1에 나타내었다. 이 곡선으로, 영률(E)을 회귀곡선법을 사용하여 초기기울기로부터 구할 수 있다. 0.2%내력($Rp0.2$)은 곡선상에서 0.2%오프셋 선을 그어 구하였다. 테이프 선재의 인장강도(Rm)는 최대하중에 해당하는 응력값이고, 파단 연실율은 하중(응력)의 급격한 저하시(A)에 해당하는 변형률값이다. 따라서 실험적으로 탄성역의 범위를 명확히하기 위하여, 응력-변형률선도에서 응력을 변형률로 미분하였다. Fig. 2는 VAM-2-3 테이프의 변형률에 따른 dR/dA 의 변화를 나타내고 있다. 초기에

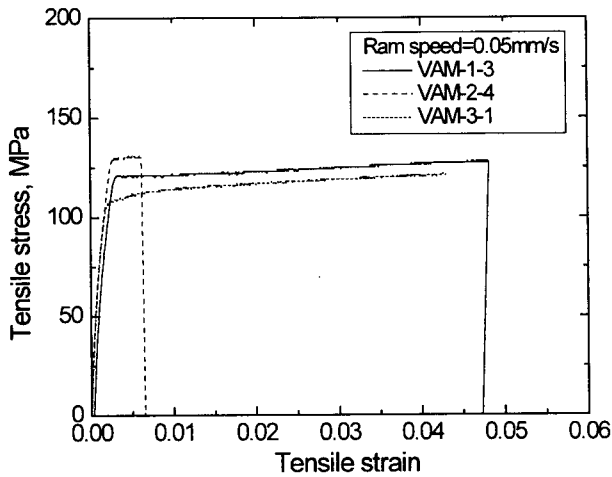


Fig. 1 Stress-strain curves.

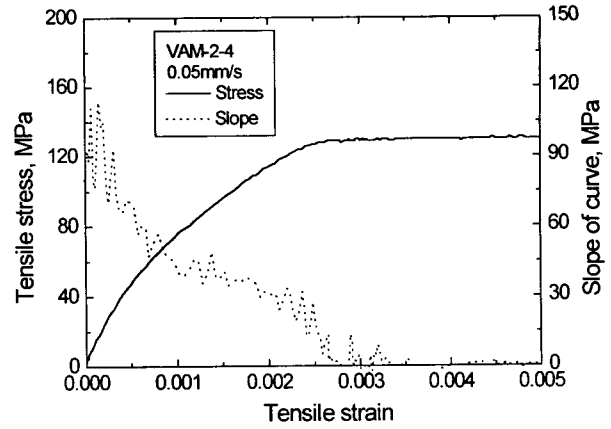


Fig. 2 Strain dependence of stress and dR/dA for tape VAM2-3.

최고값을 나타낸 후, 변형률값의 증가와 더불어 점차적으로 저하하는 거동을 볼 수 있다.

시험은 각각의 조건에서 5회 실시하였다. 그 결과를 Table 4에 요약하였다. 대부분의 경우 파단은 그림부로부터 떨어진 곳에서 일어났다. 신장계(게이지 길이 = 25.4mm)는 통상적인 재료시험용을 사용하였다. 이때 자중 지지대를 설치하여 시료에는 여분의 하중이 가해지지 않게 하였다. 나이프 애찌부에 마스킹테이프를 대어 신장계 체결시 시험편에 손상이 일어나지 않게 하였다. 그러나 시험시 신장계 애찌부에서 미끄럼은 전혀 일어나지 않았다. 본 그룹의 실험에서는 변형률구간에 따라서 응력-변형률선도의 기울기가 달라서, 영률을 목측으로 직선부 기울기로부터 구하기가 쉽지 않았다. 따라서 응력범위에 따라서 탄성계수를 아래의 4가지로 정의하였다.

Table 4. Results of tensile test reported by group F

Sample	Cross Section (mm ²)	E (GPa)	$Rp0.2$ (MPa)	Rm (MPa)	A (%)	$E1$ (GPa)	$E2$ (GPa)	$E3$ (GPa)	$E4$ (GPa)
VAM-1-1	0.949	*	108.3	113.5	3.18	56.5	83.3	57.7	46.4
VAM-1-2	0.949	*	125.5	132.7	4.44	47.9	79	62.3	170.5
VAM-1-3	0.949	*	120.9	127.4	4.82	50.7	70.2	54.6	137.9
VAM-1-4	0.952	*	121.0	128.4	4.95	111.1	90.6	63.9	86.3
VAM-1-5	0.946	*	121.2	129.6	4.68	79.6	71.9	59.3	286.8
VAM-2-3	0.554	*	132.2	135.4	2.09	53.8	67.4	56.7	65
VAM-2-4	0.545	*	129.4	129.9	0.62	91.6	82.0	62.7	*
VAM-2-5	0.560	*	117.4	118.6	0.47	51.5	61.3	50.5	*
VAM-2-6	0.554	*	120.1	121.1	0.27	68.2	75.1	56.5	*
VAM-2-7	0.554	*	129.6	132.5	0.51	50.7	72.4	58.3	*
VAM-3-1	0.815	*	110.0	121.2	4.30	83.9	78.2	75.2	*
VAM-3-2	0.820	*	124.9	135.7	3.89	56.5	78.2	64.8	129.6
VAM-3-3	0.814	*	125.9	130.1	3.98	56.0	77.2	63.9	82.2
VAM-3-4	0.797	*	112.3	125.6	5.25	69.5	69.5	57.6	*
VAM-3-5	0.797	*	128.9	142.9	4.96	84.0	84.0	70.5	25.7

E1 = 0점을 지나면서 70MPa까지 곡선의 선형 피팅으로 구한 계수, E2 = 0-70MPa사이에서 선형회귀법으로 구한 계수, E3 = 0-135MPa 사이에서 선형회귀법으로 구한 계수, 그리고 E4 = 제하구간에서 선형피팅하여 구한 계수이다.

3.2 별도의 특징적인 실험 결과

통상적인 인장시험에 부가하여 예외적인 시험 기법을 사용한 경우도 있었다. 먼저, 부하 및 제하(혹은 재부하) 시험을 세그룹(B, E, F)에서 실시하였다. 여기서 하중(응력)의 제하 범위는 출발점의 절반으로 한정하였다. 이때 탄성계수는 출발시 응력을 증가시키기에 따라서 감소하는 경향을 나타내었다.

다음으로, 시료의 변형률 측정을 위해 스트레인 게이지를 사용한 경우이다. 이때 스트레인게이지는 시험편 중앙부에 앞면과 뒷면에 부착하였다. 그러나 측정된 연신률 값은 응력이 포화를 나타냄에 따라서 더 이상 증가하지 않고 극히 작은 값을 나타내었다. 이것은 스트레인 게이지가 시료내 국부적인 변형률 값을 나타내었고, 또한 시료의 접착부는 변형이 구속되었고 상당히 강화를 가져와, 시료내 불균일 변형을 수반하는 원인으로 작용하게 된다는 것을 알 수 있었다.

4. 고찰

4.1 RRT의 요약

보고된 특성치 중 탄성계수, 항복강도, 인장강도, 파단연신률에 대한 결과를 Table 5에 정리하였다. 여기서, 영률(Elastic constant, E)은 목측으로 응력-변형률선도의 초기기울기로부터 구한 값이다. 0.2%내력(0.2% proof strength, $Rp0.2$)은 0.2% 윗셋라인을 그어 만나는 응력값을 취하였다. 인장강도(Tensile strength, Rm)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 제한없이 수행된 1차 측정결과, 항복응력 및 인장강도는 이러한 수준을 만족하는데 비하여, 영률과 파단연신율은 만족하지 못하였다.

한편 단면적의 측정결과를 Table 6(생략)에 나타내었다. 데이터는 다소 산발적이거나 그 값들의 COV는 수% 이내에 들고 있다. 따라서 단면적 측정을 위한 표준화는 불요하다고 하겠다.

4.2 영률측정

일반적으로 산화물초전도체 테이프는 취성의 초전도체층과 연성 금속기지로 구성되어 있기 때문에 공칭 영률을 구하는 것은 쉽지 않다. 왜냐하면 진 탄성역 범위가 매우 좁거나 원칙상 존재하지 않기 때문이다. 따라서 이러한 산화물에서

Table 5 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

초기 기울기(영률)를 구하기 위한 방법으로 함수 $k(A-A_0)^n$ 의 커브피팅법, 제하/재부하법, 일차미분법 등을 생각할 수 있다. 일차미분법이 금번에 제안되었고, Fig. 2에 보인바와 같이, dR/dA -A곡선은 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 dR/dA 의 최대치를 구할 수가 있다. 그러나 (1)의 경우는 어떤 합리적인 값도 구하기가 어렵다. dR/dA -A곡선으로부터, 최대값과 대응되는 변형률 값을 구하여 Table 18에 나타내었다. $A_m=0$ 의 경우를 제외하면, E_m 의 값들은 본 RRT에서 구한 정도내에 존재한다. 따라서 영률측정과 관련하여 다음번 시험에서는 R-A선도의 최대기울기를 영률로 하고, 이때 최대기울기 $(dR/dA)_{max}$ 은 dR/dA 와 A의 선도로부터 구할 수 있다.

4.3 검토사항

1차 RRT를 통하여 다음과 같은 사항들은 산화물 초전도체의 기계적 특성 평가를 위한 시험법을 확립하기 위해서는 검토되어야 한다고 생각된다.

(1) 시료의 마운팅은 중요한 인자이고, 가능한 시료에 불필요한 응력이 걸리지 않도록 시료의 부착방법이 강구되어야 한다.

(2) 변형률 측정에는 Extensometer, LVDT, Twin extensometer, 컴플라이언스법, 스트레인 게이지 법 등 여러 가지 기법들이 적용되었다.

(3) 77K와 같은 저온에서 I_c 측정을 병행해서 인장실험을 실시하는 것이 실제적인 견지에서 고려하는 것이 바람직하다.

(4) 영률측정과 관련하여, 탄성역에서 응력변형률선도의 초기기울기가 변형률과 더불어 감소하는 거동을 나타냄에 따라서 초기 기울기를 빠르게 얻을 수 있는 시안제시가 필요하다.

(참고문헌 생략)