

고온 초전도 케이블용 Bi-2223 선재의 기계적 특성

논문
11-11-13

Mechanical Characteristics of Bi-2223 Wire for High-Tc Superconducting Cable

백승명*, 김영석*, 정순용*, 김상현*
(Seung-Myeong Baek*, Young-Seok Kim*, Shun-Yong Jung*, Sang-Hyun Kim*)

Abstract

Bi-2223 superconductor is known as one of the candidates for practical superconducting wires. Ag-sheathed Bi-2223 superconducting wires were fabricated using the powder-in-tube(PIT) method. When the 19-filaments wire was immersed in liquid nitrogen(77K), maximum critical current density Jc of 62 A/mm² at 0T was achieved. The critical current density has been shown to depend on the mechanical properties such as tensile stress and bending strain in Ag-sheathed Bi-2223 superconducting wires. The tensile strain for Jc degradation onset was in the range of 0.12~0.3%. In the case of 19-filaments wire, the bending strain is estimated to be smaller than 0.3% for the reasonable Jc value. The observed degradation of the critical current density due to strain effect is inevitable and can be attributed to the formation of microcracks within the superconducting core.

Key Words (중요용어) : Bi-2223 Superconducting Wires(Bi-2223 초전도 선재), Tensile Strain(인장율), Bending Strain(굽힘율), Critical Current Density(임계전류밀도)

1. 서 론

산업사회의 지속적인 경제성장으로 대도시부에서는 전력 수요가 대량으로 집중되는 현상이 발생하고 있다. 이러한 전력수요의 고밀도화에 대해 지중케이블의 대용량화 및 복수회선의 증설 등을 하고 있으나, 지중케이블용 관로 및 전력구의 확보가 쉽지 않은 상황이다. 그러나, 극저온에서 전기저항이 갑자기 0으로 떨어지는 초전도 현상¹⁾의 발견은 지중 송전방식으로서, 송전에너지의 손실을 적게 하고 송전에너지밀도가 비약적으로 큰 초전도 전력케이블(Superconducting Power Cable)²⁾⁻⁵⁾의 응용이 가능하게 되었다. 특히, 1986년 임계온도가 향상된 산화물계 고온 초전도체⁶⁾⁷⁾의 등장으로 비등점 4.2K인 액체 He를 냉매로 사용한 저온 초전도 케이블보다 취급과 경제성이 우수한 고온 초전도

전력케이블이 주목을 받고 있다. 최근에 있어서는 전기적 특성이 양호한 수 km 길이의 고온초전도선재가 생산되어 다른 전력 기기 분야에 응용이 가능하게 되었고, 특히 고온초전도 전력케이블분야에서 초전도선재의 단면적당 흐르는 전류가 금속에 비해서 1000배 이상 크게 되고 컴팩트해서 높은 효율의 에너지 전송수단 등의 가능성이 기대되고 있다. 고온 초전도 전력케이블은 미국, 일본, 영국 등의 외국에서 활발하게 연구가 진행되고 있으며, 최근에 일본의 동경전력과 고하전공에서 66kV급 고온 초전도 전력케이블을 개발하였다.⁸⁾⁹⁾

고온 초전도체 케이블이 실용 단계에 도달하기 위해서는 Flux creep, AC loss, 접합 및 Termination, Fault current performance, 안정성 및 Aging 영향, 77K 이하의 온도에서 고전압 특성의 절연 피복재 선정, 긴 선재의 공정연구 등 기타 극복 되어야 될 많은 문제점들이 있다. 고온초전도 전력케이블의 도체부로 이용될 Bi 계 초전도 선재는 액체 N₂ 에서 비교적 높은 임계전류밀도 특성을 나타내고 있으며, 장선화 및 균질화가 비교적 용이한

* : 경상대학교 공과대학 전기공학과
(진주시 가좌동 900, Fax : 0591-759-2723
e-mail:shkim@nongae.gsnu.ac.kr)
1998년 8월 20일 접수, 1998년 10월 15일 심사완료

PIT(Powder-In-Tube)법으로 은 피복 Bi-2223 단심, 다심 Tape 상의 선재를 제작하였다. 본 논문에서는 고온 초전도 전력케이블의 도체부로 응용이 가능한 Bi-2223 계 초전도 선재의 기본적인 전기적 특성 및 자기적 특성과 기계적 파단응력과 임계전류밀도의 연신율 및 굽힘률에 대한 의존성을 77K, 0T에서 조사하였다.

2. 실험장치 및 방법

그림 1에 PIT(Powder-In-Tube)법으로 제조한 은 피복(Ag-sheathed) Bi-2223 초전도 선재의 단면 사진을 나타낸다. 제조 공정은 800℃에서 하소된 $Bi_{1.8}(Pb_{0.4})Sr_{2.0}Ca_{2.2}Cu_{3.0}O_x$ 분말을 내경 6 mm, 외경 8 mm의 은 튜브에 충전하고 Groove Rolling에 의해 선재로 만든 후 롤러기로 압연하여 테이프의 형태로 만들었다. 제작된 시편은 공기 분위기 840℃에서 100h 동안 1차 열처리를 한 후 다시 rolling하여 동일한 조건으로 2차 열처리하였다. 최종적으로 두께 0.22 mm, 폭 2.7 mm의 선재를 제조했다.

다심 선재는 분말이 충전된 단심 봉을 인발기를 사용하여 직경 1.56 mm ϕ 의 단심선재로 만든 후, 20 cm씩 19가닥으로 자르고, 다시 내경 8 mm, 외경 10 mm Ag 튜브에 넣고 직경 1.06 mm의 선재로 만들고 압연하였다. 열처리 조건은 위와 동일하며 2차 압연 후 다시 2차 열처리하였다. 표 1에 필라멘트의 parameters를 나타낸다.

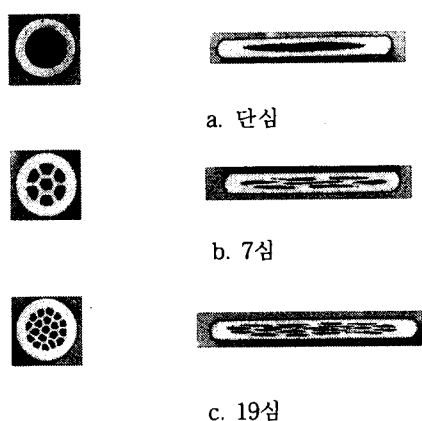


그림 1. 시료의 단면 사진
Fig. 1. Cross sectional photographs of samples

표 1. 필라멘트의 parameters

Table 1. Various parameters of filaments

| 필라멘트 수(개) | 필라멘트 두께 (μm) | 필라멘트 폭 (μm) | 필라멘트 총면적 (mm^2) | Ag 비율 |
|-----------|---------------------|--------------------|---------------------|-------|
| 1 | 120 | 1937 | 0.1605 | 2.14 |
| 7 | 35 | 573 | 0.1479 | 3.43 |
| 19 | 22 | 357 | 0.1313 | 4.79 |

제조된 초전도 선재의 임계전류(I_c)는 77K에서 4단자법에 의해 측정하였다. 임계전류는 $1 \mu V/cm$ 의 전압이 생길 때의 전류 값으로 정의하였으며, 임계전류밀도 J_c 는 측정된 임계전류 I_c 를 은을 제외한 실제 산화물 단면적 A_{oxide} 으로 나누어 계산하였다.

자장에 의한 영향을 조사하기 위해 제조된 시료를 마그넷 속에 넣고, 직류 전류원(DC Power Supply)으로 전류를 가변 시켜 자장을 시료의 중심축 방향에 평행한 방향과 수직한 방향으로 인가시키면서 4단자법에 의해 임계전류 특성을 조사하였다.

그림 2는 선재의 기계적 응력 실험의 개략도 나타낸다. 기계적 응력 및 전기적 특성 실험은 Instron만능시험기를 사용하여 액체 N_2 온도(77K)에서 행하였다. 사용한 시료는 두께 0.22mm, 폭 2.7mm인 tape 선재를 길이 6cm로 절단했다. 절단한 시료는 에틸 알코올로 표면을 깨끗이 한 후 4단자법 측정을 위해 탭을 내고, 인장시험기의 치구(jig)부분에 장착하였다. 시료의 span 간격은 3cm이다. 연신은 한쪽을 고정하고 다른 한 쪽은 controller를 사용하여 10 [mm/min]의 일정속도로 하중을 가해 일축 연신하여 파단 특성, 연신율 등의 특성을 측정하였다. 기계적 파단 특성의 데이터는 시료를 관측한 후 시료의 중앙부에서 파단된 것만을 취하여 산술 평균하였다. 연신율은 미연신시의 길이를 L_0 , 연신시의 길이를 L_1 일 때 $\{(L_1-L_0)/L_0\} \times 100(\%)$ 의 식에서 구했다. 선재의 전기적 특성은 기계적 응력으로 선재의 연신율을 0.1%씩 가변 시키면서 4단자법에 의해 값을 측정했다.

선재의 굽힘률에 대한 내성을 조사하기 위해서

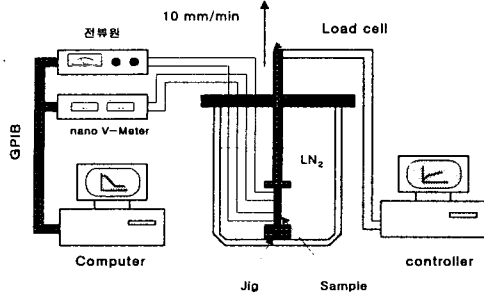


그림 2. 선재의 기계적 응력 실험의 개략도
 Fig. 2. Schematic diagram of mechanical stress set-up for wire.

자체 제작한 샘플 holder를 사용하여 굽힘 반경을 달리 하면서 77K, 0T에서 4단자법에 의해 임계전류를 측정하였다. 그림 3에 굽힘에 따른 임계전류의 측정장치를 나타낸다.

테이프의 굽힘률 (ϵ)은

$$\epsilon = \frac{t}{2r} \times 100 (\%)$$

여기서, t 는 테이프 선재의 두께이고, r 은 굽힘 반경이다.

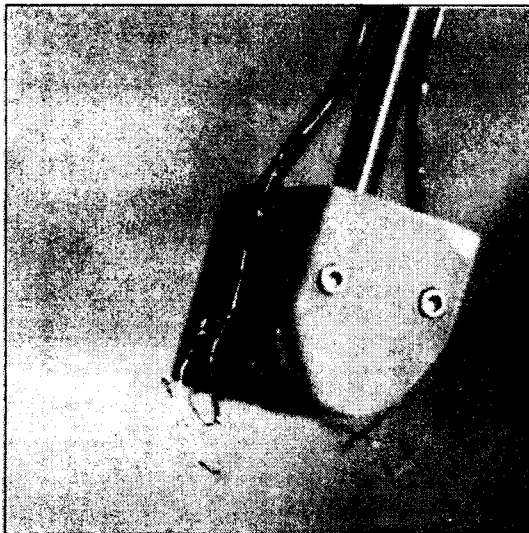


그림 3. 굽힘에 따른 임계전류의 측정장치
 Fig 3. Measuring device of critical current according to bending strain.

3. 실험결과 및 고찰

그림 4에 단심 선재의 2차 열처리 전후의 임계전류밀도 특성을 나타낸다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 1차 열처리시의 임계전류밀도는 $13[A/mm^2]$ 이고, 2차 열처리시의 경우는 $52[A/mm^2]$ 로 높은 임계전류밀도 특성을 나타낸다. 이것은 Bi-2223 산화물 초전도체가 판상의 결정 구조로 도체의 표면을 따라 임계온도가 높은 상이 형성되기 때문에 결정 성장 및 배열에 더욱 유리한 테이프 형태로 선재를 rolling 함으로써 J_c 가 향상되고, 2차열처리를 행함으로써 임계간의 약결합이 개선되어 J_c 가 향상된 것으로 생각된다. 본 연구에서 임계전류밀도는 77 K, 0 T에서 단심은 약 $52 [A/mm^2]$, 19심은 약 $62 [A/mm^2]$ 를 얻었다.

그림 5는 자장변화에 따라 직류 4단자법으로 측정된 시료의 E-I특성을 나타낸다. 선재는 외부자장에 의해 임계전류의 값이 감소하는 경향을 나타내고 있으며, 초전도에서 상전도로 전이 될 때의 저항 전이 기울기 n 값도 낮아지는 현상을 볼 수 있다.

그림 6은 직류 4단자법에 의해 측정된 단심, 다심의 자장의 배치에 따른 임계전류(I_c)의 자계 의존성을 나타낸다. 데이터는 zero-field-cooling 후에

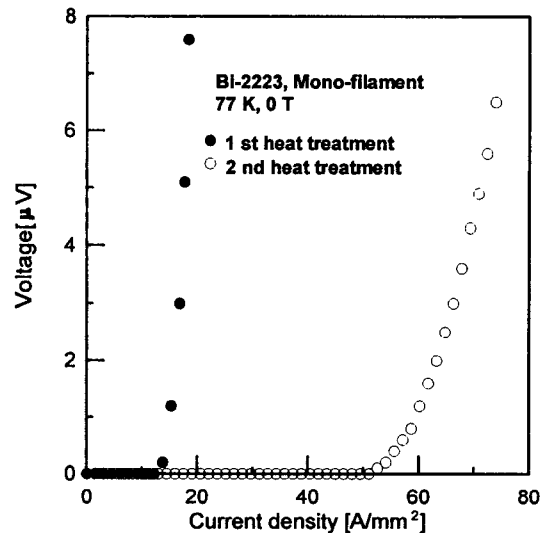


그림 4. 2차 열처리 전, 후의 임계전류밀도 특성
 Fig. 4. Critical current density characteristics before and after 2nd heat treatment

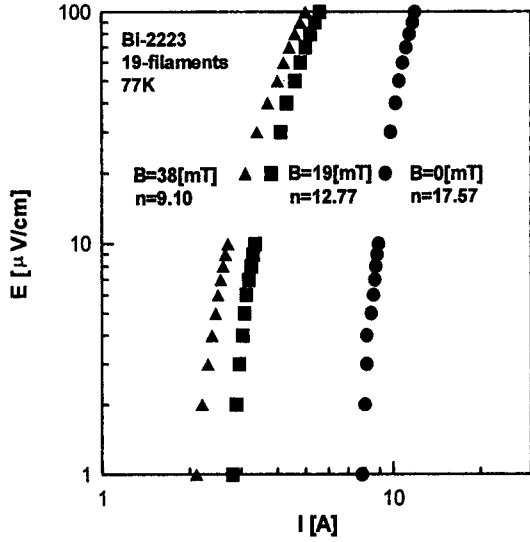


그림 5. 외부자장 변화에 따른 선재의 E-I 특성
Fig. 5. E-I characteristics of wire with various external fields

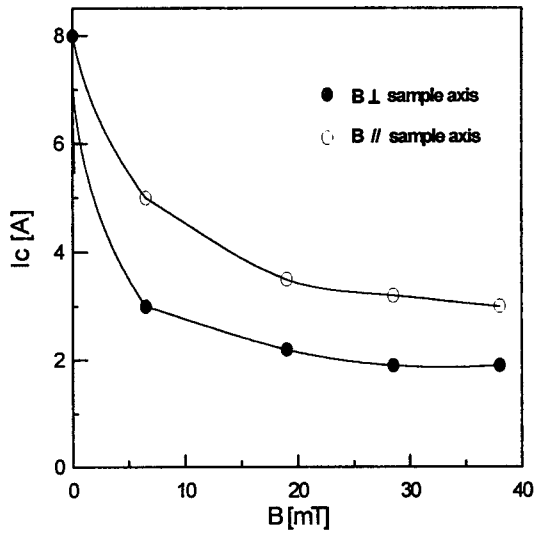


그림 6. 자장의 배치에 따른 임계전류의 자계의 의존성
Fig. 6. Magnetic field dependence of critical current on field arrangement

자계를 증가시켜 측정된 것으로 그림에서 알 수 있는 바와 같이 자계를 시료의 중심축 방향에 수평하게 인가한 경우(○)에 비해 축과 수직방향에 인가한 경우(●)의 임계전류밀도(J_c)의 감소가 크게 나타났다. Bi계 산화물 초전도체인 경우 결정 구조와 물리량이 2차원적 이방성을 강하게 나타내고 있어, a, b축 방향보다 c축 방향의 자장에 약하다. 선재의 경우도 이 특징에 의존하고 있는 듯 보이고 선재의 테이프 면에 대한 J_c 의 자장방향 의존성이 결정구조의 2차원적 이방성을 반영하고 있다고 생각된다. 또한 외부자장이 초전도체에 가해지면 초전도 결정 표면에는 외부 자장의 침투를 막기 위한 차폐전류가 흐르게 되고, 이 전류에 의해 자장과 반대 방향으로 자기자계(self-field)가 형성된다. 처음에 자장을 증가시키면서 임계전류밀도(J_c)를 측정할 때 초전도체에는 외부자장과 반대 방향으로 자기자계(self-field)가 형성되지만 실제로 초전도 상태가 아닌 결정입계에서는 외부자장과 겹쳐지는 방향으로 자계가 형성된다. 결국 시료는 실제 인가된 자장보다 더 큰 자장을 느끼게 되어 J_c 값은 더 낮아지게 된다.

그림 7에 Bi-2223 초전도 선재의 액체 N_2 온도에서의 단심과 19심의 인장응력의 연신율의존성을 나타낸다. 19심 선재의 기계적 파단강도는 단심선재의 경우

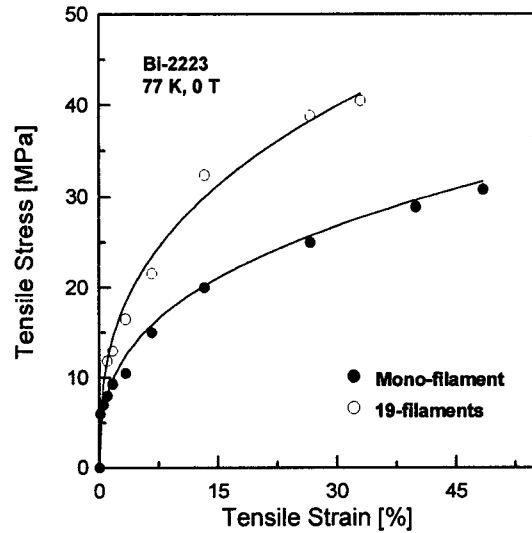


그림 7. 액체 N_2 에서 선재의 인장 곡선
Fig. 7. Tensile stress curve of wires in liquid nitrogen

보다 높으나, 인장 연신율은 작은 것을 알 수 있다. 이것을 정량적으로 비교하기 위해 동일한 열처리 조건을 행한 Ag tape만의 기계적 용력 특성과 비교한 결과를 표 2에 표시한다. 순수한 은의 파단강도가 단심, 19심 선재보다 높은 것을 알 수 있으며, 은의 비율이 높은 19심 선재가 단심보다 파단강도가 높게 나타난다. 산화물초전도 선재의 core는 취성 재료로 되어있어 외형에 의해 열화가 일어나기 쉽고 기계적으로 안정하지 못하다. 그러므로 core를 둘러싸고 있는 은에 의한 기계적인 특성이 지배적이다.

표 2. Bi-2223 초전도 선재의 기계적 특성
Table 2. Mechanical properties of Bi-2223 superconducting wires

| 선 재 | Yield Stress [MPa] | Tensile Stress [MPa] | Tensile Strain [%] | Ag 비 |
|---------------|--------------------|----------------------|--------------------|------|
| Mono-filament | 15 | 30 | 47 | 2.14 |
| 7-filaments | 25 | 40 | 32 | 3.43 |
| 19-filaments | 30 | 45 | 28 | 4.79 |
| Ag | 20 | 120 | 20 | - |

그림 8에 선재의 인장 연신율에 대한 임계전류밀도 의존성을 나타낸다. 그림에서 단심, 19심 선재는 인장 연신율에 의해 임계전류밀도가 감소하여 포화하는 경향을 보이고 있다. 단심 선재인 경우, 연신율 0.12%까지는 임계전류밀도의 변화는 보이지 않지만, 0.2%에서 미연신시의 50%의 값을 가지며, 0.3%이상 이 되면 감소하여 포화되는 경향을 나타낸다. 다심인 경우 0.3%까지 일정한 임계전류밀도의 값을 가지며, 0.5%에서 미연신시의 50%의 값을 나타내고 그 이상이 되면 점점 감소하여 포화되는 경향을 나타낸다.

그림 9에 선재의 굽힘율(ϵ)에 대한 임계전류밀도(J_c)의 특성을 나타낸다. 굽힘율은 0~0.5% 범위 내에서 실험하였다. 그림에서 알 수 있는바와 같이 단심, 19심 선재 모두 굽힘율의 변화에 따라 임계전류밀도의 특성이 감소하는 경향을 나타내고 있다. 단심의 경우 굽힘율 0.1%에서 임계전류밀도가 급격히 감소하는 경향을 나타내지만, 19심 선재인 경우 0.1%의 굽힘율까지는 임계전류밀도가 거의 일정하

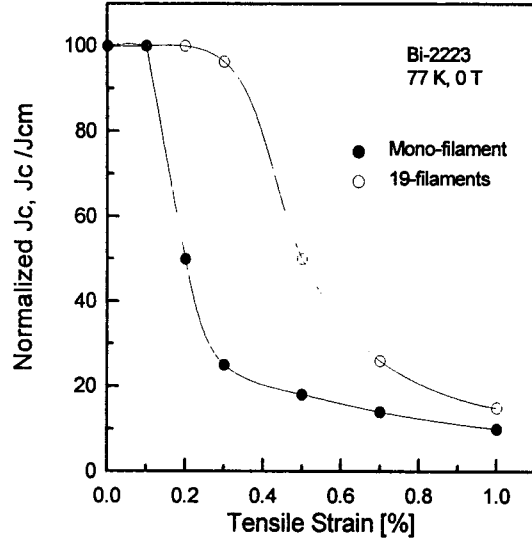


그림 8. 선재의 연신율에 따른 임계전류밀도의 의존성

Fig. 8. Tensile strain dependence of critical current density of wires

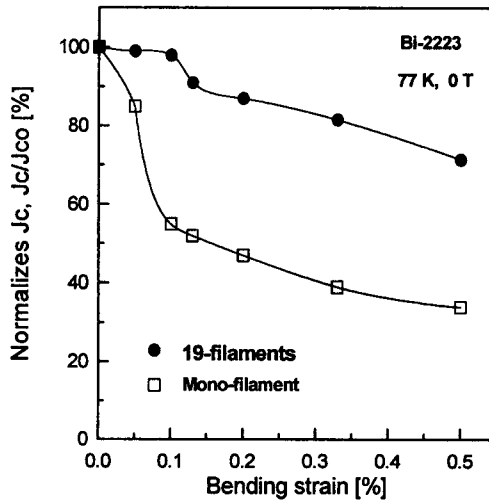


그림 9. 선재의 굽힘율에 대한 임계전류밀도 특성

Fig. 9. Bending strain vs. critical current density characteristics of wires

다가 0.3%에서 굽힘을 가하지 않은 상태의 80%, 0.5%에서는 70%로 거의 선형적 감소를 나타낸다. 따라서 다심 선재의 구조가 굽힘의 내성을 향상시키는 데 효과적이다.

그림 10에 19심 선재의 굽힘율과 n값의 관계를 나타낸다. 저항전이 지수 n값은 전계 범위 $0.33 \mu V/cm \leq E \leq 3.3 \mu V/cm$ 에서 측정하였다. 19심 선재의 굽힘율에 대한 저항전이지수 n의 관계를 살펴보면 선재의 n값은 굽힘을 가하지 않았을 때 17.5정도이고, 굽힘율 0.1%에 약 15를 나타내며 굽힘율 0.5%에서는 약 9의 결과를 나타낸다. 굽힘율에 대한 임계전류밀도와 n값을 비교하면, 0.05%이내에서는 임계전류밀도의 열화는 현저하지 않지만, n값은 열화가 발생했다. n값의 열화는 선재의 변형에 의해 미소한 전압발생에 의한 것이라 생각된다. 이상의 결과로부터 고온 초전도 선재의 기계적 특성에서 단심선재보다 다심 선재료의 응용이 더 효과적이고, 초전도 선재에 인장응력이 가해졌을 때 고온 초전도체는 응력에 대한 내성을 잃고, 미세 조직에 균열이 발생하여 임계전류밀도 특성이 거의 상실되어 은(Ag)의 도전성을 나타내게 될 것으로 사료되었다.

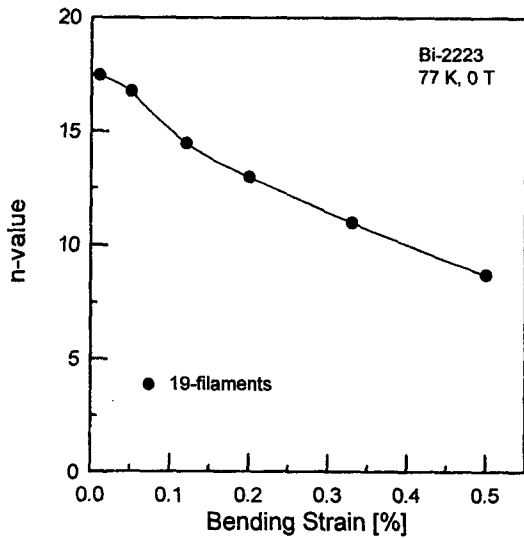


그림 10. 19심 선재의 굽힘율과 n값의 관계
Fig. 10. The relation between bending strain and n-value of 19-filaments wire

4. 결 론

본 연구에서는 향후 초전도 Cable의 도체부로 사용될 Bi-2223 초전도 선재에 일축 연신을 가하여 기계적 응력을 조사하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) Bi-2223 초전도 단심 선재의 1차 열처리시의 임계전류밀도는 $13[A/mm^2]$ 고, 2차 열처리된 경우는 $52[A/mm^2]$ 로 대단히 높은 임계전류밀도 특성을 나타내었다.
- 2) Bi-2223 초전도 선재는 외부자장에 의해 임계전류 값이 감소하는 경향을 나타내며, 자장을 시료의 중심 축 방향에 평행하게 인가한 경우보다 수직하게 인가한 경우에 임계전류 I_c 의 감소가 크게 나타났다.
- 3) Bi-2223 초전도 19심 선재는 단심 선재보다 은의 비율이 많아 기계적 응력 특성이 더 좋게 나타났다.
- 4) Bi-2223 초전도 선재의 연신율에 대한 임계전류밀도 특성을 보면, 미소한 연신율에서는 거의 변화가 보이지 않지만, 단심은 약 0.12%에서, 19심은 약 0.3%에서 임계전류밀도는 급격하게 저하되며, 연신율이 1% 이상이 되면 임계전류특성은 거의 상실되었다.
- 5) Bi-2223 초전도 선재의 굽힘율에 대해 임계전류밀도 특성을 보면, 단심은 0.1%에서 급격하게 감소하지만, 19심은 0.3%에서 선형적으로 감소한 후 포화되었다.

감사의 글

본 논문은 "1997년 한국학술진흥재단의 공모과제 연구비에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

1. H. Kamerligh Onnes, *commun. phys. lab. Leiden*, 1226, 124C, 1911.
2. E. B. Forsyth, "The High Voltage Design of Superconducting Power Transmission System", *IEEE Trans. Elect. Insul*, EI-6, pp.7-16, 1990.
3. R. G. Surrlock, "A Brief History of cryogenic", *Cryogenic*, Vol. 30. pp.483-500,

- 1990.
4. 日本電氣學會, “超傳導電力機器의 開發動向”, 電氣學會技術報告I 部, 192 號, 1985.
 5. Toshikazu Shibata et al, “高溫超傳導케이블시스템의開發”, 低溫工學 Vol. 33, No. 3, 1998.
 6. J .G. Bednorz and K. A. Muller, “Possible High-Tc superconductivity in the La-Ba-Cu-O System” Z. Physics, B-Condensed Material, Vol. 64, pp.189-193, 1986.
 7. V. beilin, M. Shieber, Y. Yaroslavsky, I. Sosonkin, H. Hermin, L. Ben-Dor, and J. Greenberg. “Fabrication and Characterization of HTSC Bi(Pb)SrCaCuO 2223 Precursor Powders, Wires and Tapers. IEEE Trans. on Appl. Superconductivity. 5(2). 1995.
 8. 向山 晋一. et al, “66kV級 高溫超傳導케이블의開發” 低溫工學. Vol. 33, No. 3 pp 137-144. 1998,
 9. T. Shibata, J. Fujikami, S. Isojima, K. Sato, H. Ishii, T. Hara, “Development of 3-phase 1kV class high Tc superconducting power cable prototype, Advances in superconductivity VIII, Springer-Verlag, Tokyo 1303 (1996)