

HTS선재의 I_c - B 특성 및 n 값 측정

The Critical Current Characteristics and n -value Measurement of HTS Tapes

구명환¹, 강명훈¹, 이희준², 차귀수^{3*}

Myunghwan Ku¹, Myunghun Kang¹, Heejoon Lee², Guesoo Cha^{3,*}

Abstract: Critical current - magnetic field (I_c - B) relation is one of the basic properties of an HTS wire, which is needed for the design of performances of superconducting devices. Experimental results of the I_c - B relation of Bi-2223 and YBCO superconducting wire are presented in this paper. n -value is also an important parameter which is needed to calculate the electric field by using the power-law. Measurement results of the n -value of the same HTS superconducting wires are also presented.

Key Words: superconducting wire, Bi-2223, YBCO, I_c - B , n -value.

구성의 불균일성에 의해 임계전류가 작게 측정 될 수도 있으며 이로 인해 정확한 n -value 측정이 용이하지 않다[4].

본 연구에서는 AMSC사에서 제작한 Bi-2223 ($\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$), YBCO ($\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7.8}$) 선재의 짧은 샘플을 가지고 임의 방향의 경사자장에 대한 I_c - B 관계와 n -value 특성을 측정하고, 측정 결과를 이용하여 고온초전도 마그넷 설계 시 사용할 수 있게 측정된 결과를 수식화하였다.

2. 측정 시료 및 방법

고온초전도 선재의 발생하는 전계와 통전전류의 관계는 식(1)로 표현이 가능하다.

$$E(B, \theta) = E_c \left(\frac{I}{I_c(B, \theta)} \right)^{n(B, \theta)} \quad (1)$$

1. 서 론

최근에 장선의 고온초전도(HTS)선재 개발과 임계전류밀도의 증가 등 많은 성능 향상과 새로운 물질을 첨가한 고온초전도 선재의 개발로 인해 고온초전도 선재의 사용이 점점 증가하고 있으며, 성능이 향상된 고온초전도 선재를 사용한 기기들의 제작이 증가하고 있다. 특히, 높은 자장이 필요한 자기부상열차, MRI (Magnetic Resonance Imaging), NMR (Nuclear Magnetic Resonance) 등에 많이 사용되어 지고 있다[1,2].

높은 자장을 만들기 위해서 고온초전도 마그넷을 제작할 때에는 고온초전도 선재를 솔레노이드 방식으로 권선하거나 팬케이크 방식으로 권선하는 방법을 주로 사용한다. 고온초전도 마그넷을 설계할 때에는 임계전류-자장(I_c - B) 관계를 이용하거나 전계-전류밀도(E - J) 관계를 이용해서 마그넷의 임계전류를 산정한다[3].

고온초전도체에 외부 자장을 인가하면 임계전류 밀도가 감소하는 문제가 발생하기 때문에, 임의 방향의 외부자장에 대한 임계전류 특성 및 n -value 특성이 매우 중요하나, 이들 중에서 임의 방향자장이 인가될 때 n -value의 측정결과가 발표된 것이 거의 없다. 보통 임계전류를 측정할 때 $1 \mu\text{V}/\text{cm}$ 를 표준 기준으로 많이 사용되어지고 있으나, 고온초전도 선재에서 물질

여기서 E 는 전계, E_c 는 임계전류가 흐를 때의 전계, I 는 통전전류, I_c 는 고온초전도선재의 임계전류, n 은 식(1)의 계산에 사용되는 지수, B 는 초전도선에 인가되는 외부자장의 세기, θ 는 외부자장의 방향으로 0° 는 수평방향, 90° 는 수직방향이다. n -value는 내부적인 요인과 외부적인 요인에 의해 많은 영향을 받는 지수이다[5]. 전압 증가 시 유동자속에 의한 영향과 필라멘트의 불균일성에 의해 선재 내부전류의 측정이 어렵고 이로 인해 n -value 값이 수시로 변화하게 된다[6]. I_c 와 n -value는 인가되는 외부 자장 B 의 크기와 각도에 의해서 변하는 값이다[7].

측정에 사용된 고온초전도선재는 BSCCO 선재와 YBCO 선재로서 선재의 특성을 Table 1에 나타내었고 임계전류의 판단기준으로 $1 \mu\text{V}/\text{cm}$ 를 적용하였을 때에 제작사에서 제시한 BSCCO 선재와 YBCO 선재의 최소 임계전류는 각각 125 A와 70 A이다.

Table 1. Specifications of HTS wires.

wire type	BSCCO	YBCO
	AMSC BSCCO-2223	AMSC 344S YBCO
Minimum I_c (self filed, 77K)	125 A	70 A
Width	4.4 mm	4.55 mm
Thickness	0.285 mm	0.31 mm
Tensile stress	250 MPa	300 MPa
Minimum bend diameter	38 mm	25 mm

¹학생회원 : 순천향대 대학원 전기통신공학과 석사과정

²정 회 원 : 순천향대 전기통신공학과 계약교수

³정 회 원 : 순천향대 전기통신공학과 교수

*교신저자 : gsoocha@sch.ac.kr

원고접수 : 2009년 09월 24일

심사완료 : 2010년 03월 09일

게재확정 : 2010년 03월 09일

초전도 선재에 외부자장을 인가하기 위하여 권철심형의 C-core 마그넷을 제작하였고, 공극 부분 철심의 단면적은 가로가 120 mm, 세로가 100 mm이다. 공극의 거리를 15 mm로 하여 공극 내에서 초전도 선재가 회전할 수 있도록 하였다. 공극에서 자장의 크기는 코일에 흐르는 전류의 크기로 조절하였고 코일의 전류가 10 A일 때 공극의 자장은 819 mT이다.

선재에 인가되는 외부자장의 각도를 변화시키기 위하여 초전도 선재를 회전시키는 방법을 사용하였고 외부자장의 각도는 0°부터 90°까지 10°씩 각도 조절 바를 이용하여 변화시켰다. 0°는 외부자장과 초전도선의 넓은 면이 수평일 때이고 90°는 수직일 때이다. 실험에 사용된 외부자장 인가용 마그넷과 초전도 선재 및 실험 장치는 Fig. 1과 같다.

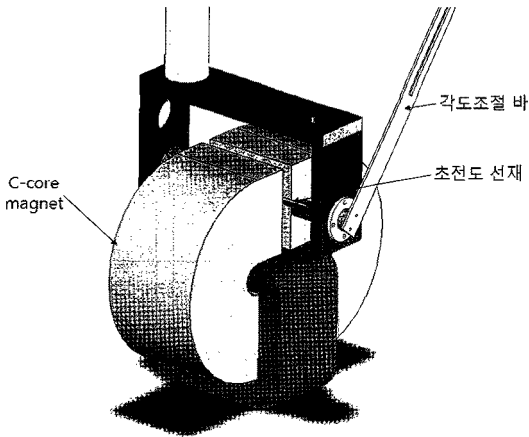


Fig. 1. Experimental apparatus.

3. 측정 결과

Fig. 1과 같은 실험 장치를 이용하여 BSCCO 선재와 YBCO 선재의 V - I 특성을 측정하였다. 모든 측정은 액체질소 온도인 77 K에서 수행되었다.

Fig. 2는 BSCCO 선재에서 외부자장의 각도가 0°인 경우로서, 외부자장을 781 mT까지 인가하며 초전도선에 흐르는 전류변화에 따른 초전도선에서 발생하는 전압을 측정된 결과이다. 같은 방법으로 각도를 0°부터 90°까지 변화하며 나머지 경우도 측정하였다. Fig. 3은 YBCO 선재의 경우로 BSCCO 선재와 같은 방법으로 측정하였다.

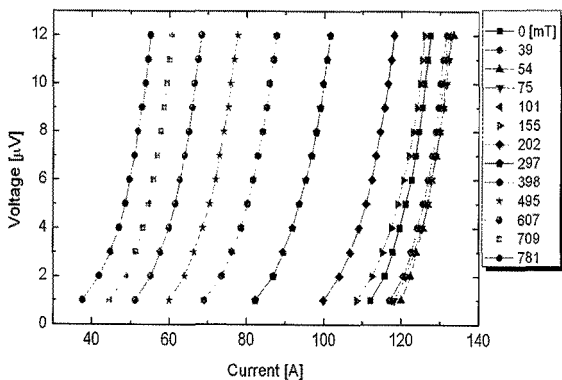


Fig. 2. V-I relation of BSCCO wire.

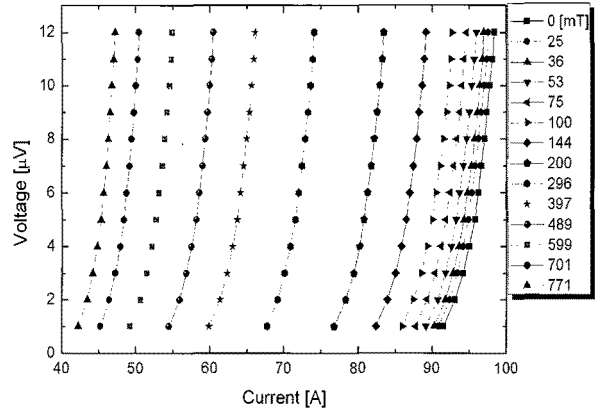


Fig. 3. V-I relation of YBCO wire.

실험에서 전압을 측정된 초전도선의 길이는 10 cm로 V - I 곡선에서 10 μ V가 발생하는 전류가 초전도선의 임계전류이다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 외부자장이 증가함에 따라 임계전류가 감소하고 V - I 곡선의 기울기도 감소한다.

또한 측정된 V - I 곡선은 식 (1)과 같은 형태의 식으로 표현할 수 있고 각 곡선에 적합한 n -value 값을 구할 수 있다.

3.1. I_c - B 특성

실험을 통해 측정된 BSCCO 선재와 YBCO 선재의 외부자장 각도별 I_c - B 특성을 그리면 Fig. 4과 Fig. 5와 같다. 외부자장이 인가되지 않은 때에 YBCO 선재의 경우에 선재 제작사에서 제시한 최소 임계전류는 70 A 이었으나 측정된 선재 시료의 임계전류는 98 A 이었다.

그림에서 볼 수 있는 바와 같이 외부자장의 크기가 증가함에 따라 초전도선의 임계전류는 감소하고 임계전류가 감소하는 폭은 외부자장이 초전도선에 수평으로 인가되는 0°일 때보다 수직방향으로 인가되는 90°일 때가 훨씬 크다. 특히 외부 자장 경사 각도가 높을 때에 임계전류가 감소하는 비율이 커서 경사진 외부 자장이 인가되면 임계전류는 큰 폭으로 감소한다. 이는 테이프 형태의 고온초전도 선을 사용하는 초전도 기기에서 수직방향의 외부자장이 많이 인가되는 부분에서 기기의 임계전류를 크게 떨어뜨리는 이유이다.

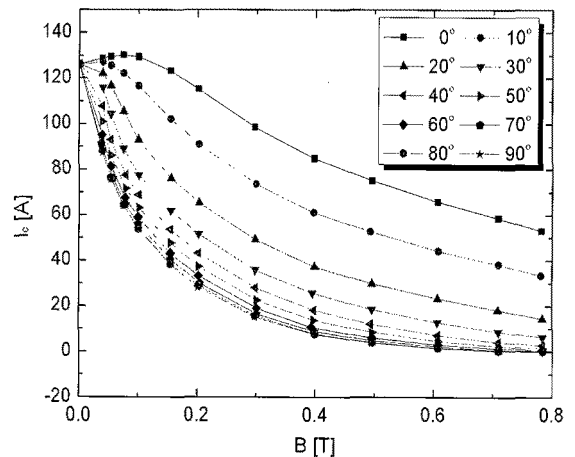


Fig. 4. I_c - B curve of BSCCO wire.

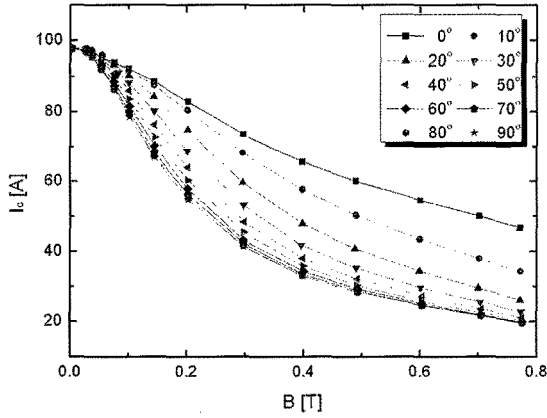


Fig. 5. I_c - B curve of YBCO wire.

BSCCO 선재와 YBCO 선재를 비교하면 수직방향 자장이 증가함에 따라 임계전류가 감소하는 것은 동일하나 YBCO 선재에서 감소폭이 적음을 알 수 있다. 외부자장이 없을 때 임계전류는 BSCCO 선재가 큰 반면에 수직방향 자장이 0.8 T 정도에 도달하면 YBCO 선재와는 달리 BSCCO 선재는 거의 전류를 흘릴 수 없는 정도이다.

3.2. n -value 특성

I - I 곡선과 식 (1)을 이용해서 BSCCO 선재와 YBCO 선재의 n -value를 계산한 결과는 Fig. 6과 Fig. 7과 같다. n -value는 E 가 E_c 의 25 %에서 100 %까지 변할 때 이를 가장 적절히 표현할 수 있는 값으로 정하였다.

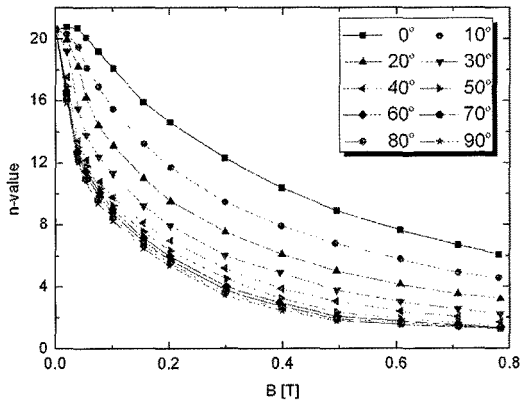


Fig. 6. n -value of BSCCO wire.

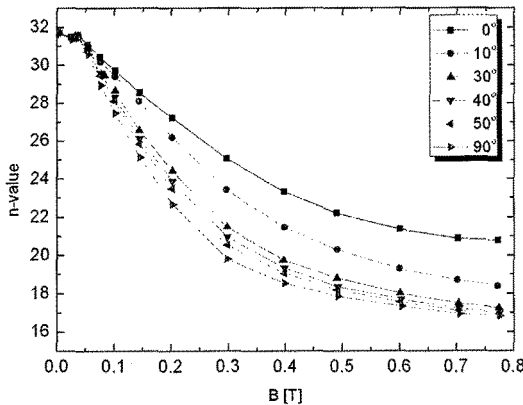


Fig. 7. n -value of YBCO wire.

4. 보간함수 표현

I_c - B 관계와 n -value를 이용해서 마그넷의 특성을 산정하기 위해서는 이들을 수식으로 표현해야 한다. 보간함수를 이용해서 측정된 I_c - B 관계와 n -value를 수식으로 표현하고 이를 그림으로 그리면 다음과 같다.

4.1. I_c - B

측정된 I_c - B 관계는 다음과 같은 수식으로 표현할 수 있다.

$$I_c = (z_0 + a_{01} * B + b_{01} * \theta + b_{02} * \theta^2 + c_{03} * \theta^3) / (1 + a_1 * B + a_2 * B^2 + a_3 * B^3 + b_1 * \theta + b_2 * \theta^2) \quad (2)$$

식 (2)를 이용해서 BSCCO 선재의 보간된 I_c - B 관계를 그림으로 표현하면 Fig. 8과 같다. Fig. 8에서 면으로 표시된 부분은 측정된 I_c - B 관계이고 진한색 선으로 표시된 것이 보간된 I_c - B 관계이다. 측정된 I_c - B 관계와 보간된 I_c - B 관계를 비교하면 측정된 I_c - B 관계 중에서 변화가 심한 부분, 특히 외부자장이 약하고 ($B \approx 0$) 수평방향의 자장 (0°)이 가해지는 부분 등에서는 차이가 있는 것을 볼 수 있다.

그러나 초전도 마그넷의 경우에는 초전도 코일 중에 외부자장이 약하고 수평방향의 자장이 가해지는 부분이 거의 없기 때문에 초전도 마그넷의 특성을 산정하는 데에는 큰 영향이 없다. BSCCO 선재와 같은 방법으로 YBCO 선재의 I_c - B 관계를 식으로 표현해서 그리면 Fig. 9와 같다.

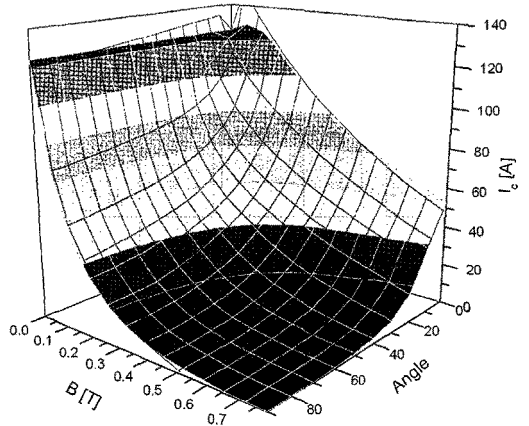


Fig. 8. Interpolated I_c - B curve of BSCCO wire.

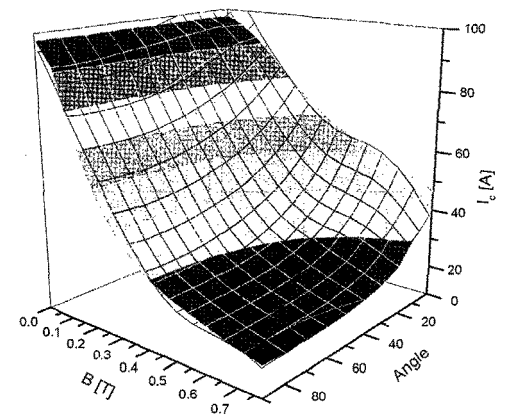


Fig. 9. Interpolated I_c - B curve of YBCO wire.

4.2. n -value

측정된 n -value는 다음과 같은 수식으로 표현할 수 있다.

$$n = (z_0 + a_{01} * B + b_{01} * \theta + b_{02} * \theta^2 + c_{02} * B * \theta) / (1 + a_1 * B + b_1 * \theta + a_2 * B^2 + b_2 * \theta^2 + c_2 * B * \theta) \quad (3)$$

식 (3)을 이용해서 BSCCO 선재의 보간된 n -value를 그림으로 표현하면 Fig. 10와 같고 그림에서 평면과 선의 의미는 Fig. 8과 같다. 측정된 n -value와 보간된 n -value를 비교하면 I_c - B 관계와 마찬가지로 n -value 중에서 변화가 심한 부분, 특히 외부자장이 약하고 ($B \approx 0$) 수평방향의 자장 (0°)이 가해지는 부분 등에서는 차이가 있는 것을 볼 수 있으나 활용하는 데에는 큰 영향이 없다. BSCCO 선재와 같은 방법으로 YBCO 선재의 n -value 관계를 식으로 표현해서 이를 그리면 Fig. 11과 같다.

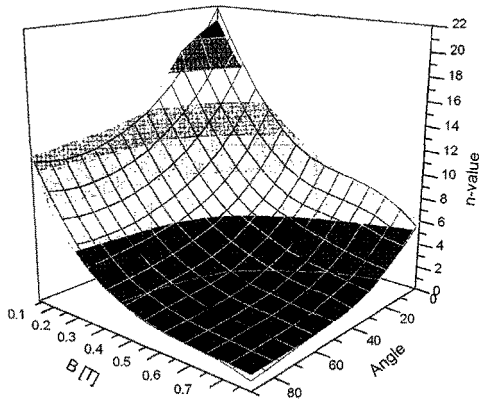


Fig. 10. Interpolated n -value curve of BSCCO wire.

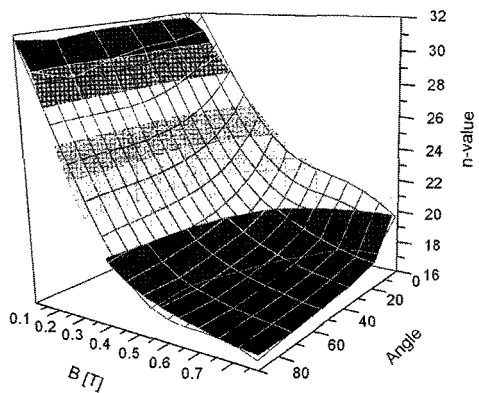


Fig. 11. Interpolated n -value curve of YBCO wire.

4. 결 론

본 연구에서는 초전도기기의 특성 산정에 필요한 I_c - B 관계와 n -value를 측정된 결과를 제시했다. 시료로는 일반적으로 많이 사용되는 Bi-2223선재와 YBCO선재를 선택했다. 측정된 결과는 보간함수를 이용해서 수식으로 표현했다. 측정된 결과와 보간된 결과를 비교하면 측정값의 변화가 큰 일부 영역에서는 차이가 있으나 초전도기기의 경우에 차이가 비교적 큰 영역에서 동작하는 초전도코일은 거의 없으므로 실용상은 큰 문제가 없다.

참 고 문 헌

- [1] H. Kitaguchi, O. Ozaki, T. Miyazaki, N. Ayai, K. Sato, S. Urayama, and H. Fukuyama, "Development of a Bi-2223 HTS Magnet for 3T MRI System for Human Brains", *IEEE Trans. Appl. Supercon.*, to be published.
- [2] J. Bascuñán, H. Lee, E. S. Bobrov, and Y. Iwasa. "A Low- and High-Temperature Superconducting NMR Magnet: Design and Performance Results", *IEEE Trans. Appl. Supercond.* Vol.13, no.2, pp.1550-1553, 2003.
- [3] Myunghun Kang, et al., "Current Estimation of an HTS BSCCO magnet Having Multiple Power Sources Based on the Field dependent E-J Relation," *IEEE Trans. Appl. Supercond.* Vol.19, no.3, pp.1257-1261, 2009.
- [4] T. M. Qu, C. Gu, M.Y.Li, and Z. Han, "V-I properties and n value of degraded Bi-2223/Ag superconducting tapes," *Physica C* 426 (2005), p. 1159-1163.
- [5] P. Kováč, L. Cesnak, T. Melišec, I. Hušek and K. Fröhlich, "Relation between critical current and exponent n in Bi(2223)/Ag tapes," *Supercond. Sci. Technol.* 10 (1997), p. 605-611.
- [6] W.H. Warnes, L.D. Cooley and D.C. Larbalestier, "Current transfer effects and their influence on the experimental critical current density of multifilamentary and monofilamentary Nb-Ti composites," *Adv. Cryog. Eng. Mater.* 34 (1988), Vol 34 p. 1009-1017.
- [7] H. Kumakura, A. Matsumoto, Y.S. Sung and H. Kitaguchi, "E-J characteristics of Bi-2212/Ag and Bi-2223?Ag tape conductors," *Physica C* 384 (2003), p. 283-290.

저 자 소 개



구명환(具明煥)
1983년 1월 14일생, 2008년 순천향대 공대 정보기술공학부 졸업, 현재 동대학원 석사과정.



강명훈(姜明勳)
1983년 4월 17일생, 2008년 순천향대 공대 정보기술공학부 졸업, 현재 동대학원 석사과정.



이희준(李喜俊)
1969년 5월 15일생, 1994년 순천향대 공대 전기공학과 졸업, 동대학원 전기공학과 졸업(박사), 현재 순천향대학교 계약 교수.



차귀수(車貴守)

1956년 7월 8일생, 1978년 서울대 공대
공업교육과 졸업, 1987년 동대학원 전기
공학과 졸업(박사), 현재 순천향대 전기
통신공학과 교수.