

전류 밀도가 다른 선재들의 자화손실 특성 평가

Estimation of Magnetization loss of HTS wires with Different Current Density

임형우¹, 윤기현², 차귀수^{1,*}, 이희준¹

H. Lim¹, K. Yoon², G. Cha^{1,*}, and H. Lee¹

Abstract: Magnetization loss of HTS wire is strongly dependent on the critical current density and the aspect ratio of the HTS wire. This paper presents the magnetization loss of stacked BSCCO wire and stacked YBCO wires which had different critical current densities. Width of the BSCCO wire was 4mm and widths of two YBCO wires were 4mm and 8mm. Single wire, two stacked, three stacked and four stacked wires were fabricated and tested. Ratio of magnetization loss of BSCCO wire to YBCO wire was presented at single wire. For stacked wire, ratio of magnetization loss of single wire to stacked wire was presented. Test results shows that magnetization losses of stacked wires were greater than that of single wire at large high magnetic field above critical magnetic field.

Key Words: Ac loss, Magnetization loss, 1G wire, 2G wire.

1. 서 론

은이나 구리와 같은 상 도체 보다 저항이 작다는 장점을 가진 초전도선에서 교류손실은 전력기기 적용에 많은 제약을 준다. 현재 고온초전도선재의 교류손실을 저감시키기 위한 여러 방법에 대해 연구가 진행되고 있으며, 교류손실을 줄일 수 있는 새로운 고온초전도선재 개발에 대한 연구도 활발히 진행되고 있다[1-3].

본 논문에서는 새로 개발된 두 종류의 YBCO선재와 한 종류의 BSCCO선재의 자화손실을 연구하였다. 두 종류의 YBCO선재는 서로 임계전류가 다르고, 선재 전체 폭도 차이가 있지만 임계전류 밀도는 큰 차이가 없다. BSCCO선재는 앞의 한 종류의 YBCO선재와 폭은 같으나, 임계전류와 임계전류 밀도는 큰 차이가 있으며, 다른 YBCO선재와는 선재 전체의 폭, 임계전류, 임계전류 밀도 모두 큰 차이가 있다.

2. 선재의 사양 및 실험 방법

2.1. 선재의 사양

Table 1은 YBCO선재의 첫 번째 샘플의 사양이다. YBCO선재의 첫 번째 샘플은 전체 폭이 8mm이고, 전체 두께는 64.2 μ m로써 YBCO선재의 일반적인 4층 구조이다. 이 선재는 금속층이 Ag로 제작되었으며, 기판층은 Ni합금 물질로써 자성 성분이 매우 작다.

Table 2는 YBCO선재의 두 번째 샘플과 BSCCO선재의 사양이다. 두 번째 YBCO선재는 첫 번째 샘플과는 달리 전체 폭이 두배 작으며, YBCO층과 기판층을 사이로 윗면과 아랫면에 금속층이 있다. 두 가지 샘플을 비교해 보았을 때 첫 번째 선재는 금속층의 두께가 얇아서 과전류에 취약하지만, 두 번째 선재는 윗면과 아랫면에 금속층이 있어 첫 번째 선재보다는 안정적이다. 그러나 금속층이 두꺼운 이유로 통전시 금속층의 와전류가 전체 교류 손실에 영향을 미칠 수 있다. 두 번째 YBCO선재의 전체폭은 BSCCO선재의 전체 폭과 큰 차이가 없고, 임계전류는 BSCCO선재보다 작으며, 임계전류 밀도는 YBCO선재의 첫 번째 샘플과 큰 차이가 없다.

BSCCO선재의 임계전류 밀도는 2.56 $\times 10^8$ A/m²이고 YBCO 샘플 1은 2.08 $\times 10^{10}$ A/m²이며, YBCO 샘플 2는 1.86 $\times 10^{10}$ A/m²이다.

Table 1. Specifications of YBCO wire sample 1 and sample 2.

	YBCO wire sample 1	YBCO wire sample 2
전체 두께	64.2 μ m	0.2mm
금속층 두께	1.20 μ m	50 μ m \times 2
기판층 두께	60.0 μ m	75 μ m
초전도층 두께	1.0 μ m	1 μ m
완충층 두께	2.04 μ m	2.25 μ m
전체 폭	8.0mm	4.4mm
임계전류	166A(at77K)	80A(at77K)

Table 2. Specifications of BSCCO wire and YBCO wire sample 2.

BSCCO wire	
전체 두께	0.21mm
전체 폭	4.1mm
모재	Ag Alloy
임계전류	130A(at77K)

¹정 회 원 : 순천향대 정보기술공학부

²학생회원 : 순천향대 정보기술공학부

*교신저자 : gsoocha@sch.ac.kr

원고접수 : 2007년 1월 4일

심사완료 : 2007년 3월 19일

Fig. 1은 YBCO선재의 적층한 그림이며, Fig. 2는 BSCCO선재의 face-to-face 방법을 사용하여 적층한 그림이다. Fig. 1과 Fig. 2에서 내부의 검정색 부분은 초전도 층이며, YBCO선재에는 Ni-W기관층, Cu급속층, 버퍼층등 여러 층이 위와 아래에 있고 BSCCO선재는 PIT법으로 제작하여 외곽은 Ag로 쌓여 있다. 초전도 선재의 적층 방법에는 앞의 방법 이외에도 edge-to-edge 적층 방법이 있으나 후자의 경우 폭이 많이 커지므로 손실값이 더욱 증가한다. 따라서 본 실험에서는 face-to-face방법을 사용하였으며, 선재와 선재 사이에는 절연을 하지 않았다[4]. 외부자장에 의한 측정 회로는 측정하고자하는 샘플에 외부에서 교류자장을 인가하여야하므로 교류자장 인가용 전자석이 필요하고, 샘플에서 발생하는 자화에 의한 손실을 측정하기 위하여 Pickup 코일이 필요하다. 본 논문에서는 측정을 위해 Linked-Pickup-Coil 방법을 사용하였으며, 이와 같은 방법 외에도 자화손실 측정방법에는 Saddle-Shape-Coil, Rectangular-Coil을 사용하여 측정하는 방법도 있다[5-6].

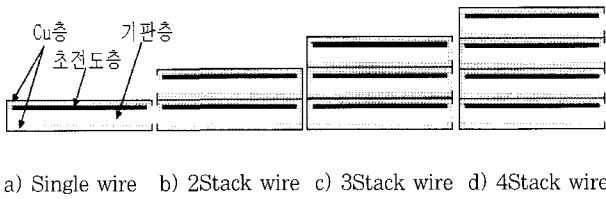


Fig. 1. Stacking of YBCO wire.

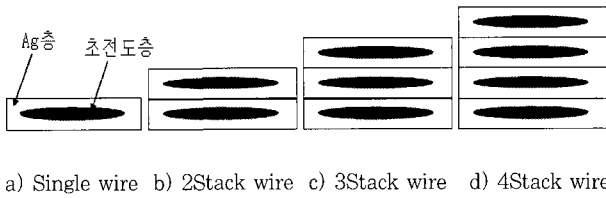


Fig. 2. Stacking of BSCCO wire.

2.2. 실험방법

Fig. 3은 본 실험에 사용한 회로 구성으로 자화손실 측정을 위한 회로도이다. 픽업코일과 상쇄코일은 지름이 50 μ m인 에나멜선을 사용하였으며, 각각1000턴을 권선하였다. 초전도선재의 샘플은 픽업코일 내부에 위치한다.

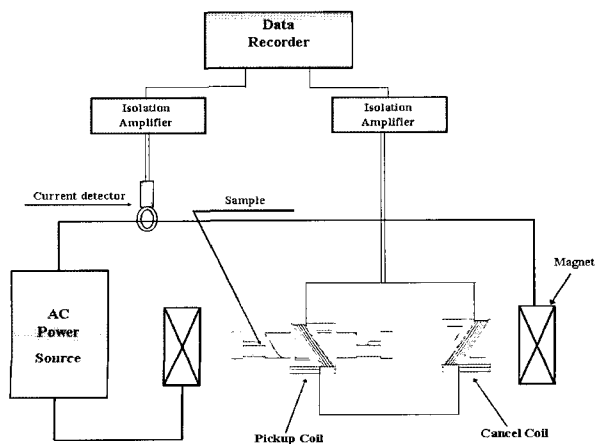


Fig. 3. Measurement circuit of magnetization loss.

외부자장을 인가할 경우, 픽업코일에 유기되는 전압은 초전도선재 샘플에서 발생하는 자장과 외부에서 인가해준 자장이 합성된다. 따라서 초전도선재의 샘플에서 발생하는 자장만을 얻기 위해 픽업코일과 동일한 턴수의 상쇄코일을 픽업코일에 연결해서 외부자장에 의한 유기기전력을 상쇄시킨다. 고온초전도선재의 자화손실은 균일한 외부자장을 고온초전도선재에 인가할 때 발생하는 에너지의 유출입으로부터 얻을 수 있다. 1주기 동안의 자화손실은 식(1)과 같이 표현할 수 있다. 식(1)에서, \vec{E} 는 샘플을 따라 발생된 전계, \vec{H} 는 외부 인가자계의 세기이다.

$$Q_m = \oint_s \vec{E} \times \vec{H} \cdot d\vec{s} \tag{1}$$

식(1)을 측정된 전압과 전류 신호로부터 고온초전도선재의 1주기 동안 단위체적에서 발생하는 자화손실로 표현하면 식(2)을 얻을 수 있다.

$$Q_m = \frac{C_{pu}k}{V_s} \frac{1}{T} \int_0^T v(t) i(t) dt \tag{2}$$

위의 식(2)에서, k 는 자석상수이고, C_{pu} 는 픽업코일 보정상수, V_s 는 샘플의 체적이다.

YBCO선재 샘플1과, 샘플2 그리고 BSCCO 단일 선재들의 단위체적당에서 발생하는 자화손실을 측정할 결과는 Fig. 4와 같다. 같은 전류밀도를 가진 선재라 할지라도 선재의 폭이 다를 경우 체적당의 손실값은 작은 폭을 가진 선재가 작다. 또한 같은 선재의 폭이라 할지라도 임계전류밀도가 낮은 선재의 자화손실이 작다. 또한 Fig. 4의 오른쪽 그림은 BCCO선재를 기준으로 YBCO선재들을 비율로 나타낸 것이다. 이 그림에서 폭이 작은 선재는 BSCCO선재보다 10여배 정도 컸으며, 폭이 넓은 선재의 경우 100배가 넘는 손실 결과를 보였다. 그리고 비율의 패턴은 폭이 작은 선재의 경우 급격히 상승하는 경향을 보였으며, 폭이 넓은 선재의 경우 감소하는 경향을 보였다. 이러한 결과는 급속층의 두께가 두꺼워 와전류에 의한 영향이라 할 수 있으며, 와전류의 의해 발생한 자계가 외부자장이 초전도 층에 가해지는 것을 일부 차폐하기 때문이라 할 수 있고, BSCCO선재의 손실이 같은 폭의 YBCO선재의 손실보다 작은 것은 전류밀도가 100배가량 작기 때문이다.

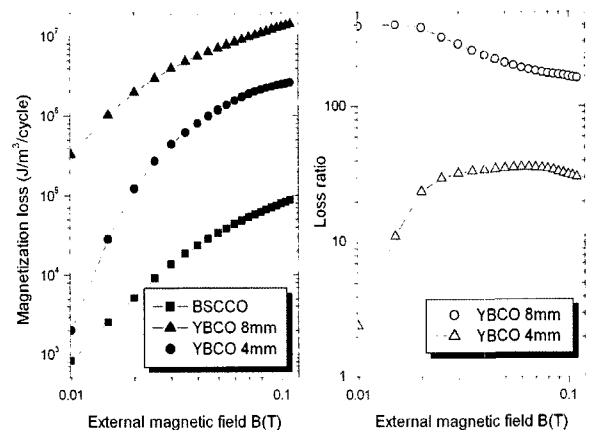


Fig. 4. Magnetization loss per unit volume and loss ratio of BSCCO wire and YBCO wires.

BSCCO선재와 YBCO선재들의 단위 길이당의 손실을 측정 한 결과가 Fig. 5로서, 폭이 BSCCO선재와 같고 전류밀도가 큰 선재의 경우 BSCCO선재의 단위 길이당의 손실 결과보다도 작았다. BSCCO선재의 적층에 따른 단위체적당의 손실을 측정 한 결과는 Fig. 6과 같고 이로부터 선재의 적층에 따른 손실은 적층수가 증가할수록 체적당의 자화손실은 감소하고 있다. 또한 적층수가 증가할수록 자화손실 결과의 기울기가 커지고 있다. 이러한 이유는 적층수가 증가할수록 적층한 선재의 완전침투 영역이 높은 자장의 영역으로 이동한다고 할 수 있다. Fig. 6의 왼쪽 체적당의 손실과 오른쪽 체적당의 손실에 따른 비율의 결과로부터 자화손실은 적층할수록 작아진다고 할 수는 있지만, 더 높은 자장을 인가할 경우 적층수가 많은 선재일수록 손실은 더 증가할 것이다.

Fig. 7은 폭이 넓은 YBCO선재의 적층 수 증가에 따른 단위 체적당의 자화손실 결과이며, 실험했던 자장 영역에서 역전되는 현상이 없었다.

폭이 작은 YBCO선재의 적층수를 증가시키면서 자화손실을 측정하면 Fig. 8과 같다. 전체적인 측정 결과의 손실 경향은 Fig. 6의 결과와 같이 적층할수록 낮은 자장의 영역에서는 손실은 감소하였다. 폭이 작은 YBCO 단일선재의 완전침투 영역은 7.4mT이고 BSCCO선재는 21.5mT로써 YBCO선재가 낮은 자장영역에 있고, 100mT 영역에서 YBCO선재의 손실은 적층수가 많을수록 자화손실 값이 컸다. 오른쪽 비율 그림에서는 급격히 변화하는 손실경향이 잘 나타나 있으며, 이 결과에는 금속층의 와전류에 의한 영향이 포함되어 있다.

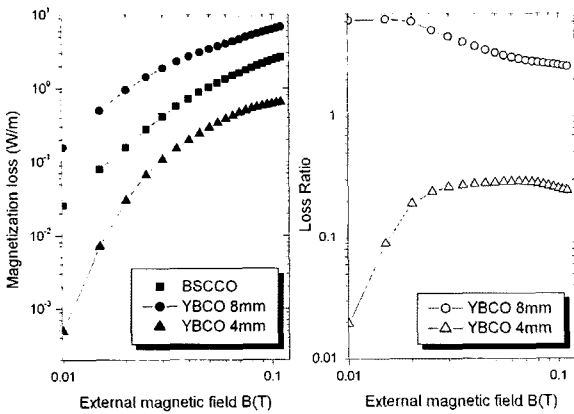


Fig. 5. Magnetization losses per unit length and loss ratio of BSCCO and YBCO wire.

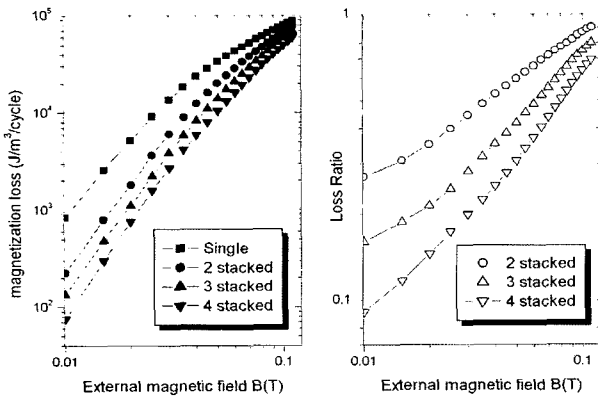


Fig. 6. Magnetization losses per unit volume and loss ratio of BSCCO wire at different number of stack.

BSCCO선재의 적층수를 변화시키면서 단위길이당의 자화손실을 측정하면 Fig. 9와 같다. 단위길이당의 자화손실은 낮은 자장영역에서는 선재를 적층 할수록 손실 값이 작아지고, 높은 자장의 영역에서는 선재를 적층 할수록 손실 값이 컸다.

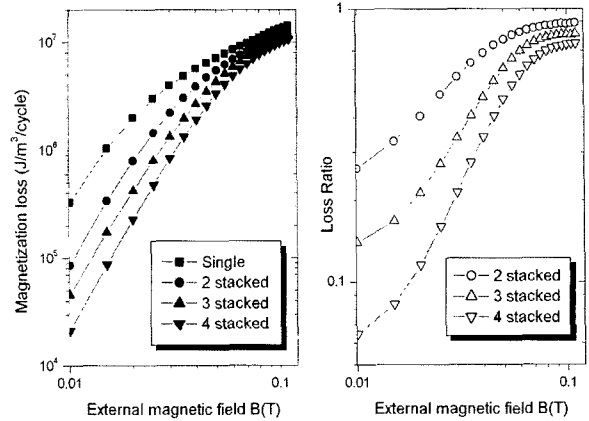


Fig. 7. Magnetization losses per unit volume and loss ratio of YBCO sample 1 at different number of stack.

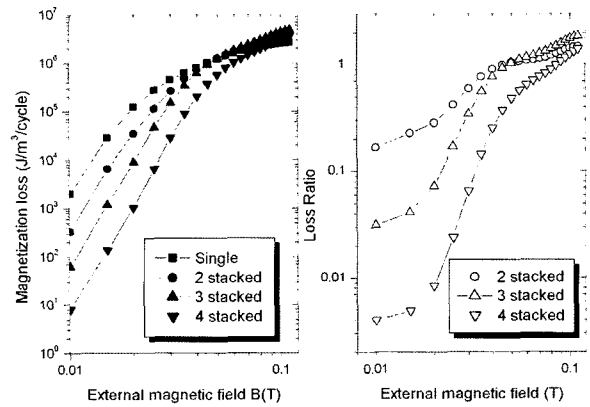


Fig. 8. Magnetization losses per unit volume and loss ratio of YBCO sample 2 at different number of stack.

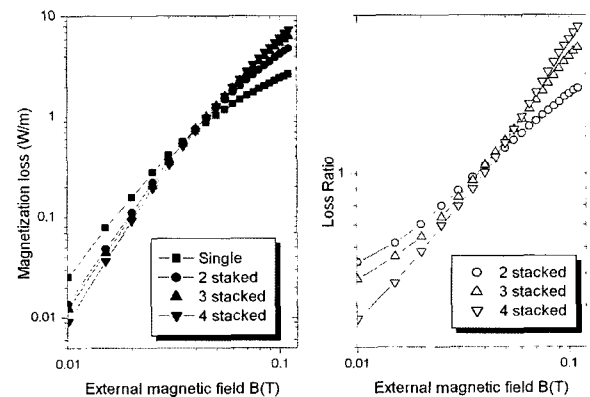


Fig. 9. Magnetization losses per unit length and loss ratio of BSCCO wire at different number of stack.

Fig. 10은 폭이 작은 YBCO선재의 적층수를 증가시키며 측정된 것으로 역시 단위 길이당의 자화손실로 표시했다.

Fig. 11은 폭이 넓은 선재의 단위길이당의 손실 결과이다. 이 결과도 Fig. 9의 BSCCO선재와 같이 낮은 자장의 영역에서는 적층할수록 단위길이당 손실이 작고, 높은 자장의 영역에서는 적층수를 증가시킬수록 단위길이당의 손실이 크다.

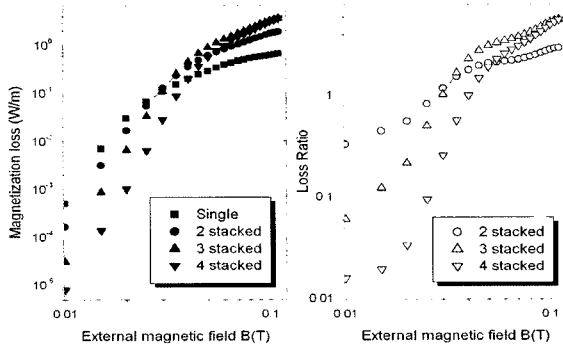


Fig. 10. Magnetization losses per unit length and loss ratio of YBCO sample 2 at different number of stack.

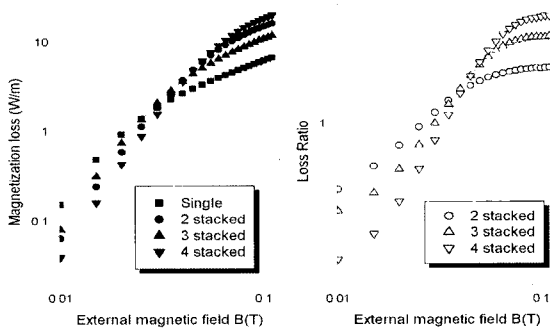


Fig. 11. Magnetization losses per unit length and loss ratio of YBCO sample 1 at different number of stack.

4. 결 론

본 논문에서는 전류밀도가 다른 선재와, 선재의 폭, 적층수가 다를 경우 각각에 대해서 단위길이당 및 단위체적당의 자화손실 특성을 비교하였다. 결과에 의하면 선재의 폭이 다르고 임계전류밀도가 같을 경우 20mT 이상의 자장에서는 폭이 작은 선재의 단위길이당의 자화손실이 약 10배 작았으며, 임계전류 밀도가 다르고 폭이 같을 경우는 20mT 이상의 자장에서 임계전류밀도가 낮은 선재의 단위길이당 자화손실이 약 5배 높았다. 대부분의 초전도전력기에 사용되는 선재들에 인가되는 자장이 수십 mT 이상인 것을 고려하면 초전도전력기에서는 임계전류밀도가 높고 폭이 작은 초전도선재를 사용하는 것이 자화손실 측면에서 유리한 것으로 나타났다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 차세대초전도응용기술개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- [1] T. Watanabe, Y. Shiohara, and T. Izumi, "Progress and Future Prospects of Research and Development on Coated Conductors in Japan," *Trans. Applied Superconductivity*, Vol. 13, No. 2, pp. 2445-2591, 2003.
- [2] G. Snitchler, B. Gamble, and S. S. Kalsi, "The performance of a 5MW high temperature superconductor ship propulsion motor," *IEEE Tans. on Appl. Super.*, Vol. 15, No. 2, pp. 2206-2209, 2005.
- [3] J. J. Rabbers, B. ten Haken, and H. H. ten Kate, "Advanced AC loss measurement methods for high-temperature superconducting tapes," *Review of Scientific Instruments*, Vol. 72, No. 5, pp. 2365-2373, 2001.
- [4] K. -H. Muller, "Ac losses in stacks and arrays of YBCO/Hastelloy and monofilamentary Bi2223/Ag tapes," *Physica C* 312, pp. 149-167, 1999.
- [5] M. Iwakuma, et al., "AC Loss Properties of YBCO Superconducting Tapes Exposed to External AC magnetic Field," *IEEE Trans. on Appl. Super.*, Vol. 15, No. 2, pp. 1562-1565, 2005.
- [6] Amemiya, N. and Jiang, Z., "Magnetization loss of YBCO Coated Conductors and BSCCO multifilamentary tapes," *Supercond. Sci. Technol.* Vol. 17, pp. 295-299, 2004.

저 자 소 개



임형우(林炯佑)
1972년 1월 18일생, 2000년 순천향대 공대 전기공학과 졸업, 2002년 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 2006년 동 대학원 졸업 (공학박사).



윤기현(尹基鉉)
1980년 12월 7일생, 2005년 순천향대 공대 정보기술공학부 졸업, 현재 동대학원 석사과정.



차귀수(車貴守)
1956년 7월 18일생. 1978년 서울대 공대 공업교육학과 졸업, 1987년 동대학원 전기공학과 졸업(공학박사), 현재 순천향대 공대 전기통신공학과 교수.



이희준(李喜俊)
1969년 5월 15일생. 1994년 순천향대 공대 전기공학과 졸업, 동대학원 전기공학과 졸업(공학박사), 현재 순천향대 학교 계약교수.