

YBCO CC와 BSCCO Tape의 적층에 따른 자화손실 특성비교

Comparison Magnetization Losses of the multi-stacked YBCO Coated conductor and the BSCCO tapes

임형우*, 이희준**, 차귀수***, 이지광#

Hyungwoo Lim*, Heejoon Lee**, Gueesoo Cha***, Ji-kwang Lee#

Abstract: Multi-stacked HTS tapes are needed to conduct large current in the power application. In this paper, magnetization losses of the multi-stacked YBCO coated conductor and the BSCCO tape have been measured and compared. Magnetization losses of single tape, 2-stacked, 3-stacked and 4-stacked HTS tapes have been presented in this paper. Multi-stacked tapes have been fabricated using face-to-face type stacking method. Measurements of magnetization loss were performed under various stacked of external magnetic field to consider the anisotropic characteristics of HTS tapes. Test results show that loss density per unit volume decreased for both YBCO coated conductors and BSCCO tapes when the stacking number of tapes is increased. As the external magnetic field decreased, the ratio of decrement has risen because the full penetration magnetic field(Bp) of the multi-stacked tape is larger than that of the single tape.

Key Words: YBCO CC, BSCCO, AC loss, Magnetization Loss

1. 서 론

1986년 임계온도 30K이 넘는 고온초전도체의 발견 이후 고온초전도 분야는 급속히 발전하여 현재 77K의 액체 질소를 냉매로 쓰이는 고온초전도선재까지 개발되었으며 초전도 선재의 산업적 응용을 눈앞에 두고 있다.

고온초전도선재는 크게 1세대 초전도 선과 2세대 초전도 선으로 구분하고 있다. 1세대 초전도선을 사용한 중규모 초전도전력기기가 개발되고 있기는 하지만 1세대 초전도선은 외부자장의 인가가 증가할수록 임계전류밀도가 큰 폭으로 줄어든다는 단점이 있어서 강한 자장이 발생하는 초전도전력기기에 응용하는데 어려움이 있다. 특히 테이프 형태의 초전도선에 외부자장이 수직인 방향으로 가해지면, 임계전류밀도는 현저히 감소한다.

1세대 초전도선의 임계전류밀도는 기존의 구리선보

다는 100배정도 높지만 위에서 언급한 대로 강한 자장이 인가되는 경우에는 임계전류 밀도가 큰 폭으로 감소해서 초전도선을 사용하는 효과를 감소시킨다. 이러한 이유 때문에 임계전류밀도가 높고 강한 자장이 인가되어도 전류밀도가 감소하는 정도가 적은 2세대 초전도선을 개발하기 위한 연구가 미국과 일본 등에서 진행되고 있고, 국내에서도 한국전기연구원 등에서 개발을 진행 중이다. 2세대 초전도 선재를 제작하는 방식에 따라 차이는 있지만 1세대 초전도선에 비해서 10배 이상의 전류 용량을 가지고 있으며, 외부에서 자장이 인가되었을 때의 전류밀도 감소도 작기 때문에 2세대 초전도선이 상용화되면 1세대 초전도선을 완전히 대체할 것으로 예상하고 있다[1,2].

본 논문에서는 2세대 초전도선인 YBCO Coated conductor와 BSCCO tape 샘플을 1, 2, 3, 4적층 하면서 외부자장을 수직으로 인가시켰을 경우 발생하는 자화 손실을 측정 하였다. 또한, YBCO Coated conductor는 두께가 매우 얇으므로 브란트가 이론식으로 제시한 strip 모델에 대해서 외부 자장이 수직 방향으로 가해질 경우에 대해서 측정값과 비교하였다.

2. 선재구조 및 실험결과

2.1. YBCO CC와 BSCCO적층 구조

YBCO Coated Conductor와 BSCCO 선재의 적층을 하였을 경우 단일 선재에서 발생하는 자화 손실과 적층 하였을 경우 발생하는 자화손실을 알아보기 위하여 Fig. 1과 같은 구조의 샘플을 만들어 측정 하였다. YBCO CC는 Ag layer, YBCO layer, Buffer layer, Substrate layer의 구조로서 제작 방법에 따라 조금씩 차이는 있지만 기본적으로 4가지 층으로 구분할 수 있다. 본 논문에서 사용한 YBCO CC의 샘플은 Table 1에 있는 것과 같이 Ag layer는 1.2 μ m, YBCO layer는 1 μ m, Buffer layer는 2.04 μ m, Substrate layer는 60 μ m의 두께를 가진 샘플을 사용 하였으며, 샘플의 전체 폭은 8mm이다. 또한 이 샘플은 액체질소 내에서 임계전류를 측정 하였을 경우 166A로 측정 되었다. BSCCO tape는 멀티 필라멘트 구조로 되어있으며 전체 폭은 4.1mm이고 두께는 0.21mm인 샘플을 사용하였으며, 액체질소 내에서의 임계전류는 125A였다.

2.2 실험 결과

자화손실 측정 회로는 측정 하고자하는 샘플에 외부에서 교류자장을 인가하여야 하므로 교류자장 인가용 전자석이 필요하고 샘플에서 발생하는 자화에 의한 손실을 측정하기 위하여 Linked-Pickup-Coil을 사용 하였으며, 이와 같은 방법 외에도 Saddle-shape-coil,

* 학생회원:순천향대학교 전기공학과 박사과정
 ** 정 회 원:순천향대학교 정보기술공학부 계약교수
 *** 정 회 원:순천향대학교 정보기술공학부 교수
 # 정 회 원:우석대학교 전기공학과 부교수
 원고접수:2005년 09월 12일
 심사완료:2005년 09월 21일

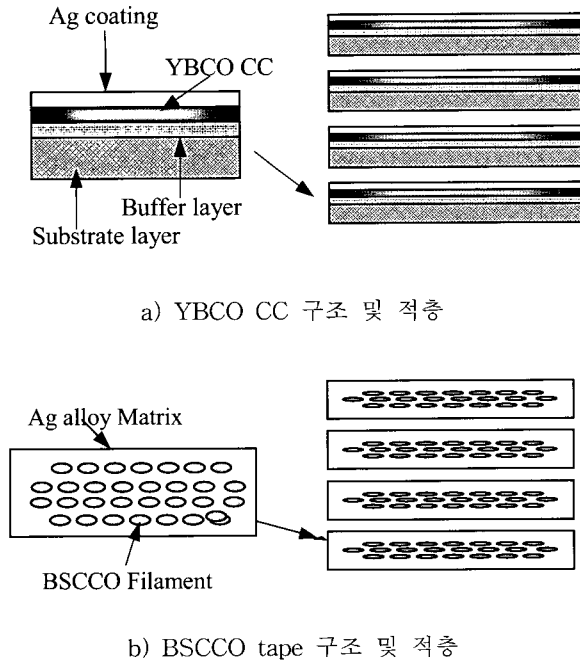


Fig. 1. Geometry of multi-stacked YBCO CC and BSCCO a)YBCO CC b)BSCCO Tape.

Table 1. Specification of YBCO CC and BSCCO Tape.

YBCO Coated Conductor	Width	8 mm
	Ag Thickness	1.2 μm
	YBCO Thickness	1 μm
	buffer Thickness	2.04 μm
	Substrate Thickness	60 μm
	Ic	166A at 77K
BSCCO Tape	Width	4.1mm
	Thickness	0.21mm
	core area	(4.1mm*0.21mm)*0.59
	Ic	125A at 77K

Rectangular-Coil을 사용하여 측정하는 방법이 있다 [3-5].

Fig. 2는 본 실험에 사용한 회로 구성이며 자화손실 측정을 위한 회로도이다. Pickup-Coil과 Cancel코일은 지름이 50 μm 인 에나멜 선을 사용하였으며, 각각1000턴을 감아서 사용하였다. 초전도선재의 샘플은 픽업코일 내부에 위치한다. 외부자장이 인가되는 경우에 픽업코일에 유기되는 전압은 초전도선재 샘플에서 발생하는 자장과 외부자장과의 합성에 의해 나타나므로 초전도선재의 샘플에서 발생하는 자장만을 얻기 위해 픽업코일과 동일한 턴수의 캔슬코일을 픽업코일에 연결해 외부자장에 의한 유기기전력을 상쇄시킨다.

$$Q_m = \oint_s \vec{E} \times \vec{H} ds \quad (1)$$

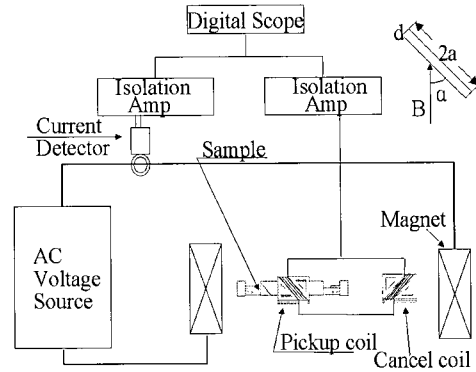


Fig. 2. Magnetization loss measurement system in external magnetic field.

고온초전도선재의 자화손실은 균일한 외부자장을 고온초전도선재의 샘플에 인가할 때 발생하는 에너지의 유출입으로부터 얻을 수 있으므로 1주기 당, 단위길이 당 자화손실은 식(1)과 같이 표현 할 수 있다.위의 식 (1)에서, \vec{E} 은 샘플을 따라 발생된 전계, \vec{H} 는 외부 인가자계의 세기이다.

식(1)을 측정된 전압, 전류 신호로부터 고온초전도선재의 1주기 당, 단위체적 당 자화손실로 표현하면 식 (2)를 얻을 수 있다.

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

위의 식(2)에서, k 는 자장인가용 코일자석의 단위 전류당 발생 자속밀도를 나타내는 자석상수이고, C_{pk} 는 픽업코일 보정상수, V_s 는 샘플의 체적이다. 또한, 수직방향 외부자계에 의한 고온초전도 선재의 자화손실 계산은 두께가 매우 얇은 strip 형상에 대해서 Brandt가 제시한 strip model을 이용한 식(3)과 같이 계산 할 수 있다[6]. 식(3)으로부터 YBCO Coated Conductor 단일 선재에 외부자장을 수직으로 인가시켰을 경우에 적용하여 실험결과와 비교하였다.

$$Q = \frac{4a^2 J_c dB}{S} \left[\frac{2}{\beta} \ln(\cos \beta) - \tan \beta \right] \quad (3)$$

식(3)에서 $\beta = B/B_c$ 이고, $B_c = \mu_0 J_c d / \pi$ 이며, a 는 샘플 폭의 1/2, d 는 두께이다. 식(3)은 두께가 YBCO Coated Conductor와 같이 두께가 얇고 평판인 모델에 적합하며, 본 실험에 사용한 YBCO Coated Conductor 를 적층 하였을 경우와 BSCCO tape와 같이 타원형 모델에 적용하기는 부적합하다.

Fig. 3은 단일 YBCO Coated Conductor와 단일 BSCCO tape의 자화 손실을 비교한 그래프이다. 이 Fig. 3에서 검정색 사각형의 기호는 YBCO Coated Conductor이고 흰색 사각형 기호는 strip Model인 식 (3)을 이용하여 계산한 값이다. 그리고 검정색 별표 기호는 BSCCO tape의 자화손실 값이다. Fig. 3에서 알 수 있듯이 strip model과 YBCO Coated Conductor와는 잘 일치 하고 있음을 보이고 있으며 YBCO Coated Conductor와 BSCCO tape를 비교해 보았을 경우 체적 당의 자화손실 밀도가 YBCO Coated Conductor가 100 배 이상 큰 것을 알 수 있다.

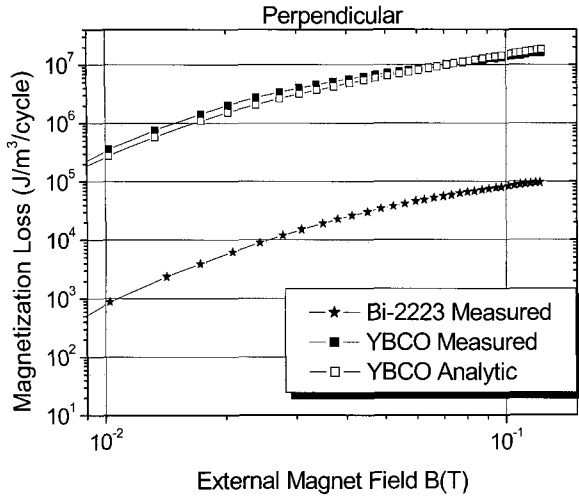


Fig. 3. Comparison magnetization losses of the single YBCO coated conductor and BSCCO tape.

Fig. 4는 YBCO Coated Conductor를 각각 1, 2, 3, 4 적층한 후 수직 자장을 인가하였을 경우 발생하는 자화손실 값과 BSCCO tape를 각각 1, 2, 3, 4 적층한 후 수직자장을 인가하였을 경우 샘플에서 발생하는 자화 손실 값을 비교한 그래프이다. 검정색의 기호로 된 것들은 YBCO Coated Conductor의 손실값을 나타내고 흰색 기호들은 BSCCO tape의 손실 값을 나타낸 것들이다. 또한 사각형 기호는 단일 샘플이고 원형 기호는 2적층한 샘플, 삼각형 기호는 3적층한 것이고 별표 기호는 4적층한 샘플의 손실을 각각 나타내고 있다.

Fig. 3과 같이 단일 샘플일 경우와 적층에 따른 손실은 YBCO Coated Conductor가 체적당 손실 값이 BSCCO 보다 크다는 것을 알 수 있고, 적층수가 증가할수록 단일 선재보다 손실 값이 감소하고 있음을 나타내고 있다. 또한, 초전도 선재에 완전침투 되는 자장의 값이 적층수가 증가함에 따라 증가하고 있음을 알 수 있다. 이러한 결과는 적층을 함으로써 전류 용량을 높이는 역할과 함께 외부자장의 차폐효과도 증가시킬 수 있을 것으로 예상된다.

Fig. 5는 YBCO CC의 자화손실 값에서 단일 샘플로 적층 선재에서 측정된 값을 나눈 값이다. 이 그래프로부터 단일 선재의 손실에 비해서 적층을 하였을 경우 손실의 비율이 얼마나 감소하는지 또한 외부자장의 증가에 따라서 손실값이 증가하는 경향을 알 수 있다. 사각형 기호는 YBCO CC의 단일 선재이며 원형의 기호는 YBCO CC를 2적층 한 것이고 삼각형은 3적층한 것, 역삼각형은 4적층을 한 것이다. 적층 수에 따라 손실의 증가 비율이 단일 샘플에 비해 감소하고 있음을 나타내고 있다. 그러나 그래프에서 나타나듯이 적층수에 비례적으로 손실이 감소하고 있음을 나타내고 있지는 않다. 다시 말해서 단일 샘플을 1로보고 2적층 하였을 경우 손실이 2배 감소하는 것이 아니며 3적층 하였다고 하여 손실이 단일 샘플에 비해 3배 작아진다고 할 수 없다. 따라서 전력기기에 적용을 하여 사용할 경우 적당한 용량을 산정하여 적층을 하는 것이 유리할 것으로 여겨진다.

Fig. 6은 BSCCO 선재에서 발생하는 손실을 Fig. 5와 같이 단일 샘플의 손실로서 적층 샘플에서 발생하는 손실 값을 나눈 값이다. Fig. 5의 YBCO CC의 선재에서 발생하는 손실비와는 그래프 형상이 조금 다르다. 이러한 이유는 초전도 선재에 외부 자장이 가해졌

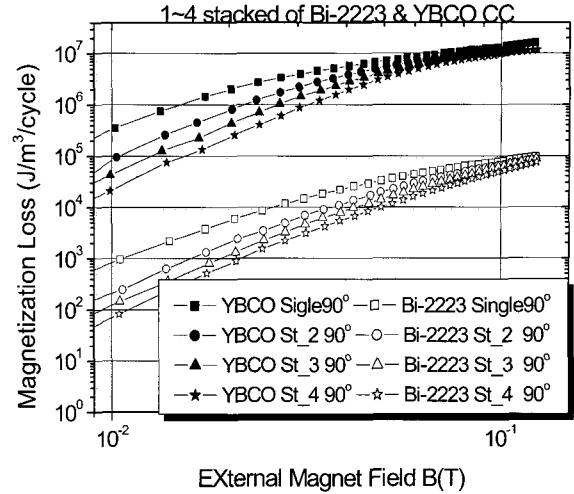


Fig. 4. Comparison Magnetization Losses of the multi-stacked YBCO Coated Conductor and BSCCO tape.

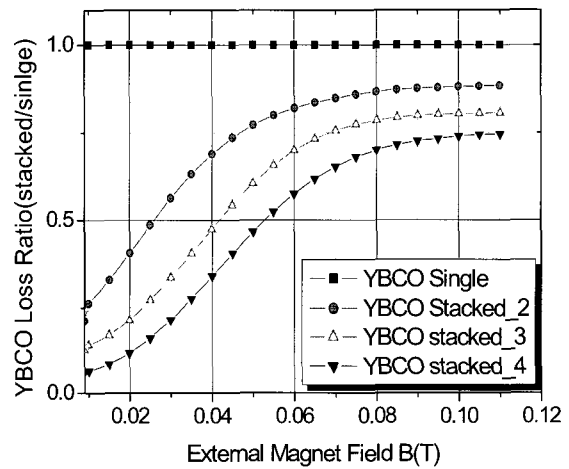


Fig. 5. Magnetization losses ratio of multi-stacked sample and single sample at YBCO CC.

을때 자장이 완전 침투하는 영역이 다름으로 인한 것으로 예상된다. BSCCO tape도 마찬가지로 적층수에 따라서 손실이 감소하는 것으로 결과를 보이고 있다. Fig. 5에서 70mT 이전에는 손실비율이 급격히 증가하고 그 이후에서는 증가비율이 감소하여 완만해지지만, Fig. 6은 측정영역 모두 증가하고 있다. 이유는 BSCCO tape가 YBCO CC에 비해 외부자장의 완전침투 되는 지점이 높아서라 할 수 있다. Fig. 5와 Fig. 6을 비교해 보았을 경우 적층을 할 경우 YBCO CC가 BSCCO tape 보다 자장 낮은 영역에서는 전력기기에 적용한다는 것이 손실면에서 바라보았을 경우 불리하나 선재에 가해지는 자장이 높은 영역 120mT 이상의 영역에서는 YBCO CC 선재가 유리할 것으로 예상된다. 그러나 이는 체적당의 손실 비율만을 가지고 예상한 것이며 전력기기에 적용을 할 경우 YBCO CC 및 BSCCO tape의 전류 밀도 등 기기의 용량과 사용할 경우 선재에 가해지는 외부자장의 영역을 고려하여 할 것이다.

Fig. 7은 YBCO CC와 BSCCO tape의 단일 및 적층에 따른 단위 길이당의 손실을 나타낸 그림이다.

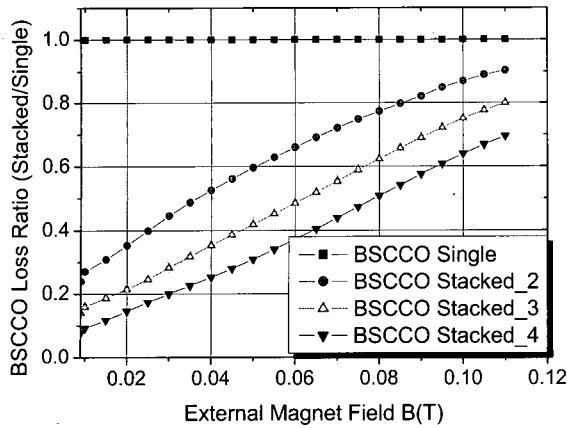


Fig. 6. Magnetization loss of the multi stacked sample and single sample at BSCCO tape.

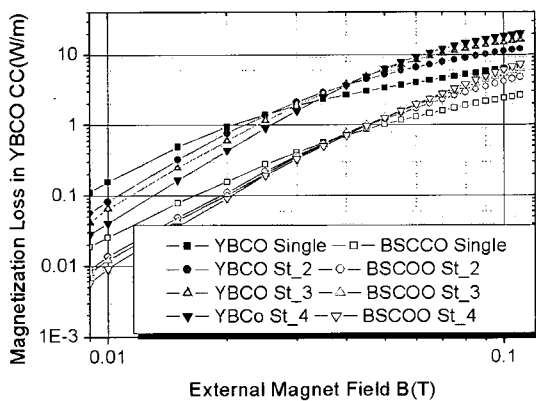


Fig. 7. Magnetization loss of the YBCO CC and BSCCO tape.

3. 결 론

본 논문에서는 BSCCO tape와 YBCO CC의 단일 선재 및 적층한 선재에 외부 자장을 인가하였을 경우 발생하는 자화 손실을 측정하였다. 그 결과 YBCO CC 및 BSCCO tape의 단일 샘플일 경우 YBCO CC 선재가 단위 체적당의 손실로 보았을 경우 100배가량 높았으며, 단위길이당의 손실로 보았을 경우 3배가량 높았다. 또한 YBCO CC 및 BSCCO tape를 적층 하였을 경우 각각의 단일 샘플의 손실 값보다 적층을 할수록 손실 값이 감소하였다. 또한 각각의 단일 샘플로부터 적층을 하였을 경우의 손실 증가 비율을 보았을 경우 BSCCO tape가 낮은 외부자장의 영역에서는 손실 비가 YBCO CC 보다 작았으며, 외부자장이 증가함에 따라 BSCCO tape가 YBCO CC 선재보다 손실 비율의 증가가 커짐을 알 수 있었다.

감사의 글

이 논문은 2003년도 한국 학술진흥 재단의 지원에 의하여 연구되었음(KRF-2003-042-D00078)

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] V. Matias et al., "Accelerated Coated Conductor Program at Los Alamos National Laboratory," IEEE Trans. Applied Superconductivity, Vol. 13, no. 2, pp. 2488-2491, 2003.
- [3] Amemiya N. and Jiang Z., "Magnetization loss of YBCO Coated Conductors and BSCCO multifilamentary tapes," Supercond. Sci. Technol. 17 pp. 295-299, 2004.
- [4] Masataka Iwakuma, Keniro Toyota et al., "AC loss properties of YBCO superconducting tapes fabricated by IBAD-PLD technique," Physica C 412-414 (2004) pp. 983-991
- [5] J. J. Rabbers, "AC LOSS IN SUPERCONDUCTING TAPES AND COILS," Ph. D. dissertation, Dept. Elect. Eng., Twente Univ., 2001.
- [6] Ernst Helmut Brandt, "Type-II-superconductor strip with current in a Perpendicular Magnetic ", Physical review B, Vol. 48, No. 17, 893-906, November 1993.

저 자 소 개



임형우(林炯佑)

1972년 1월 18일생, 2000년 순천향대학교 전기공학과 졸업, 2002년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.



이희준(李喜俊)

1969년 5월 15일 생. 1994년 순천향대 공대 전기공학과 졸업 1996년 동대학원 전기공학과 졸업(석사), 동대학원 전기공학과 졸업(공학박사), 현재 순천향대학교 계약교수.



차귀수(車貴守)

1956년 7월 18일생. 1978년 서울대 공대공업 교육학과 졸업, 1987년 동대학원 전기공학과 졸업(공학박사) 현재 순천향대 공대 정보기술공학부 교수.



이지광(李志光)

1966년 6월 1일생. 1986년 서울대 공대 전기공학과 졸업, 1992년 동대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 1997년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사), 현재 우석대 전기공학과 부교수.