

BSCCO 선재와 YBCO 선재의 솔레노이드 코일의 전기적 특성 비교

Comparison of Electrical Characteristics of The Solenoid Coils made of YBCO wire and BSCCO wire

임형우¹, 이동민², 차귀수^{1,*}, 이지광³, 최홍순⁴

H. Lim¹, D. M. Lee², G. Cha^{1,*}, Ji-Kwang Lee³, H. Choi⁴

Abstract: Solenoid coil is one of the commonly used one in superconducting power machines because it can produce uniform magnetic field at the center of the coil. Most of the AC loss in a solenoid coil is magnetization loss which is generated by the perpendicular magnetic field. This paper compares the electrical characteristics of two solenoid coils made of YBCO wire and BSCCO wire. We made and tested the BSCCO solenoid coil and YBCO solenoid coil which had the same number of turns and inner diameter. Number of turns and inner diameter of both coils were 30 turns and 10cm, respectively. AC loss of both coils were calculated by using the finite element method. Result shows that AC loss of YBCO coil was about 1/7 of that of the BSCCO coil when the current was 40A.

Key Words: AC loss, BSCCO wire, coil loss, solenoid coil, YBCO wire.

1. 서 론

고온초전도선재는 크게 1세대 고온초전도선과 2세대 고온초전도선으로 구분하고 있다. 1세대 초전도선을 사용한 중규모 초전도전력기기가 활발히 개발되고 있기는 하지만 1세대 고온초전도선은 외부에서 자장이 인가되면 임계전류가 큰 폭으로 감소하는 단점이 있어서 강한 자장이 발생하는 초전도전력기기에 사용하는데 많은 어려움과 문제점을 가지고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 새로운 선재의 개발이 진행되었고, 그 결과 현재 2세대 선재라 불리는 YBCO 선재(YBCO CC)가 개발되었다. 이렇게 개발된 YBCO 선재는 BSCCO 선재의 제작 방법인 PIT법과는 달리 박막증착 방법으로 제작되며, 기관층, 버퍼층, YBCO층, 금속층의 기본 4개의 층으로 이루어져 있다[1].

YBCO 선재는 BSCCO 선재보다 전류밀도가 높고 외부자장이 가해져도 전류 밀도의 감소가 작다는 유리한 이점을 가지고 있다. 이러한 이점은 강한 자장을

만드는 전력기기에서 자장이 선재에 가해져도 통전용량의 감소가 적다고 예측되므로 전류용량 증가 측면에서 매우 유리할 것으로 보고 있다[2-3].

본 논문에서는 새롭게 개발된 2세대 선재와 1세대 선재의 사양으로부터 솔레노이드 코일을 설계하였고, 이러한 값을 이용하여 유한요소 방법으로 교류 손실을 계산 하였다. 또한 초전도 영역의 계산은 트란트가 제시한 방법을 이용하였다. 이렇게 계산한 결과와 비교하기 위하여 BSCCO 선재와 YBCO 선재를 이용하여 솔레노이드 코일을 제작하였다.

2. 코일 사양 및 손실 계산

2.1. BSCCO 코일의 사양

BSCCO 선재는 Fig. 1과 같이 초전도층의 외부가 은층으로 둘러 쌓여있으므로 설계에 따른 교류 손실을 계산할 때 초전도체 면적을 고려해야 한다.

BSCCO 코일 설계에 사용한 BSCCO 선재는 Table 1과 같이 선재의 폭은 4.1mm이고 폭은 0.21mm의 선재를 사용 하였다. 솔레노이드 코일 형태이므로 코일 제작시 턴과 턴 사이에 절연거리 확보 및 선재위치 고정을 위해 거리를 두어 계산하였다. 또한 솔레노이드 코일의 전체 턴수는 30턴이고, 내경은 10cm, 전체 길이는 약 9.4m이다.

2.2. YBCO 코일의 사양

YBCO 선재는 Fig. 2와 같은 형태로써 전체 폭은 4.4mm, 전체 두께는 0.2mm 이고 층의 구조를 갖고 있으므로, 각층에서 발생하는 교류 손실을 계산하여야 한다. 그러나 대부분의 손실은 초전도선재에서 발생하므로 코일 형태를 계산할 경우에는 초전도체 면적만을 계산하며, 본 논문에서도 초전도층에서의 교류 손실만을 계산하였다. YBCO 솔레노이드 코일은 BSCCO 선재를 이용한 코일과 비교를 하기 위해서 같은 크기로 설계하였다[4-5].



Fig. 1. Cross section of BSCCO wire.



Fig. 2. Cross section of YBCO wire.

¹정 회 원 : 순천향대학교 정보기술공학부

²학생회원 : 순천향대학교 정보기술공학부

³정 회 원 : 우석대학교 전기공학부

⁴정 회 원 : 성균관대 정보통신공학부

*교신저자 : gsoocha@sch.ac.kr

원고접수 : 2007년 1월 4일

심사완료 : 2007년 2월 9일

Table 1. Specifications of BSCCO wire and YBCO wire.

BSCCO wire		YBCO wire	
선재두께	0.21mm	선재두께	0.2mm
선재폭	4.1mm	선재폭	4.4mm
모재	Ag Alloy	금속층두께	50μm*2
Twist	No	기판층두께	75μm
임계전류	130A(at 77K)	초전도층	1μm
		임계전류	80A(at77K)

2.3. 교류손실 계산

교류전류가 흐르는 코일은 통전 전류와 함께 인접한 턴에 흐르는 전류에 의해 자계가 발생한다. 이렇게 발생한 자계는 자기 자신뿐 아니라 다른 턴에 가해지고 이로 인하여 코일에서는 통전에 의한 자기 자계 손실과 외부자계 즉 다른 턴에서 흐르는 전류에 의해 발생한 자계가 가해짐으로 외부자계 손실이 발생한다. 본 논문에서는 코일에 전류가 흐를 경우 발생하는 자계에 의한 손실을 유한요소법으로 계산하였다. 수직 자계성분에 의한 손실은 브란트식을 사용 하였으며, 수평자계 성분에 의한 손실은 월슨식을 사용하여 계산하였다[6].

코일에 인가되는 수직자계는 식(1)과 같이 계산하였다.

$$H_{\perp}(k) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |H_{\perp,e}(i)| \quad (1)$$

위의 식(1)에서 N은 요소이며, H_{\perp} 는 수직방향 자계이고, k는 선재 번호이다. 위의 식(1)에서 얻은 값으로부터 수직 방향에 의한 손실을 계산하기 위하여 이론식으로 제시된 브란트 식에 대입하여 수직 방향에 의한 교류손실을 계산하였다. 아래의 식은 브란트가 제시한 이론식이다.

$$q_{\perp}(k) = \frac{4\mu_0 a^2 J_c H_{\perp}(k) d}{S} \left[\frac{\beta}{2} \ln(\cosh\beta) - \tanh\beta \right] \quad (2)$$

위의 식(2)에서 a는 선재폭의 1/2이고, d는 선재의 두께, S는 선재의 단면적, β, H_c 는 다음의 식(3)과 같다.

$$\beta = \frac{H}{H_c}, \quad H_c = \frac{J_c d}{\pi} \quad (3)$$

위의 식 (3)에서 H_c 는 완전 침투 자계이고, J_c 는 임계전류밀도이다.

위의 식들로부터 코일에서 발생하는 교류손실 중 선재의 넓은 면의 방향으로 자계가 인가될 경우의 손실은 다음의 식(4)과 같다.

$$Q_{\perp} = \sum_{k=1}^M q_{\perp}(k) \times S \times f \times l(k) \quad (4)$$

위의 식(4)에서 f는 주파수, l(k)는 한턴의 길이이며, M은 코일의 턴 수이다.

코일에서 수평자계에 의해 발생하는 손실은 다음의

식들과 같이 정리할 수 있다.

$$H_{//}(k) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |H_{//,e}(i)| \quad (5)$$

$$q_{//}(k) = 2\mu_0 H_{//}^2 \frac{\beta}{3}, \quad \beta < 1 \quad (6)$$

$$q_{//}(k) = 2\mu_0 H_{//}^2 \left(\frac{1}{\beta} - \frac{2}{3\beta^2} \right), \quad \beta \geq 1 \quad (7)$$

따라서 코일의 수평방향에 의한 손실은 다음의 식(8)과 같이 쓸 수 있다.

$$Q_{//} = \sum_{k=1}^M q_{//}(k) \times S \times f \times l(k) \quad (8)$$

위의 식(4)과 식(8)을 이용하여 코일에서 발생하는 손실을 계산하였다. 또한 초전도층이 아닌 BSCCO 선재의 은층과 YBCO 선재의 금속층 및 기판층은 그 손실 값이 전체의 교류손실에 크게 미치지 않는다는 결과로 계산에 포함 하지 않았다.

3. 코일제작 및 측정

3.1. 코일제작

코일 제작은 설계에 따라서 전체 턴수는 30턴이며 코일 영역은 4.4mm이고 코일의 절연 및 위치 고정을 위해서 폭 1mm 높이 3mm의 턱을 고려하여 제작 하였다. Fig. 3은 YBCO, BSCCO 코일을 제작하기 위한 보빈 그림이다. 보빈은 FRP로 제작하였으며, 선재가 감기는 외경은 10mm이다.

Fig. 4와 5는 BSCCO, YBCO 선재를 이용하여 제작한 코일 그림들이다.

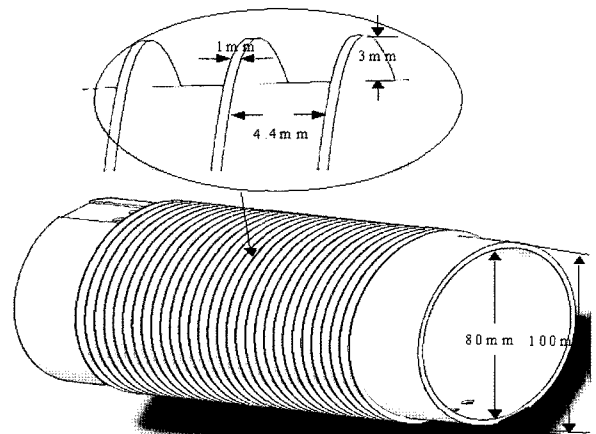


Fig. 3. Bobbin of solenoid coil.

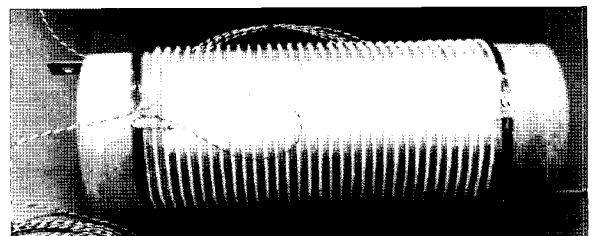


Fig. 4. Solenoid coil made of BSCCO wire.

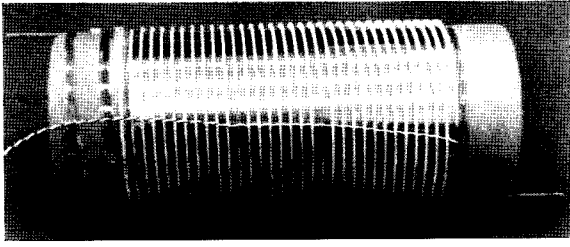


Fig. 5. Solenoid coil made of YBCO wire.

3.2. 측정

Fig. 6은 실험을 위한 측정 회로도이다. 코일 실험을 할 경우에는 코일의 인덕턴스 성분에 의하여 유기 전압이 높게 발생하므로 측정기의 입력한계전압 보다 높아 직접 측정을 할 수가 없다. 그러므로 코일 양단에 병렬로 전압 디바이더를 사용하여 전압을 낮추어 주고 캔슬 코일을 이용하여 유도성 성분의 전압을 제거한다. 이와 같은 방법으로 코일에서 발생하는 교류 자계에 의한 저항성 성분의 손실을 측정 할 수 있다.

Fig. 7은 YBCO 코일과 BSCCO 코일의 전류의 증가에 따른 전압을 측정 결과이다. 본 연구에서 각 코일의 임계전류를 측정해본 결과 YBCO 코일은 임계전류가 61A였으며 BSCCO 코일은 121A였다. Fig. 7에서 사각형 기호는 BSCCO 코일의 전압 분포이며, 원형 기호는 YBCO 코일의 전압 분포로써 BSCCO 선재를 사용한 코일이 임계전류가 높았다. 또한 곡선의 형태는 샘플 실험 결과들과 같이 YBCO 코일의 전압 분포가 매우 급격히 상승하고 있다.

Fig. 8은 BSCCO 코일의 교류 손실을 측정한 결과와 해석에 의한 결과를 나타낸 것이다. 이 그림에서 실선은 유한요소방법을 이용하여 얻은 결과이며, 사각형의 점들은 측정에 의한 결과이다. 높은 전류가 흐르는 영역에서는 두 그래프의 경향이 교차되며 측정 결과의 교류손실은 계산의 의한 결과보다 상승 폭이 컸다.

Fig. 9는 YBCO 코일의 교류손실을 측정한 결과와 해석에 의한 결과를 나타낸 것이다. 이 그림에서 도 측정값과 해석값이 크게 차이가 나지 않고 있으며, 또한 높은 전류가 흐르는 영역에서 Fig. 8과 같이 해석에 의한 교류손실 상승 폭보다 측정에 의한 손실의 상승 폭이 컸다.

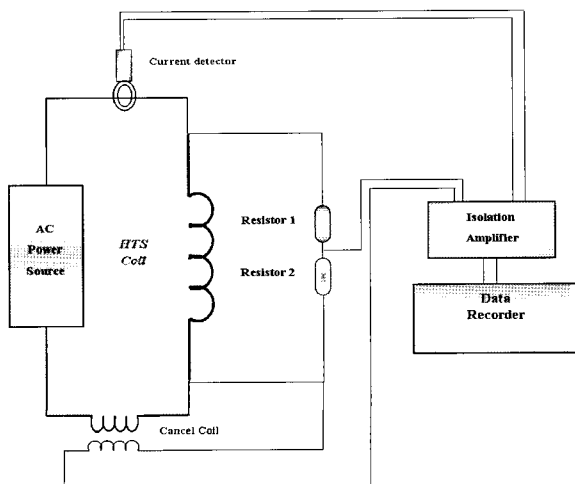


Fig. 6. Circuit of measurement.

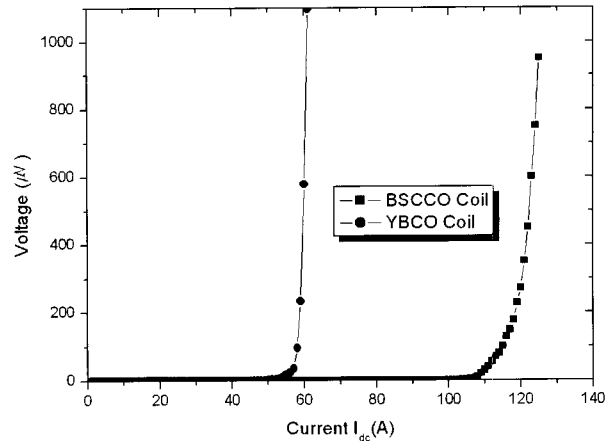


Fig. 7. V-I Curve of YBCO coil and BSCCO Coil.

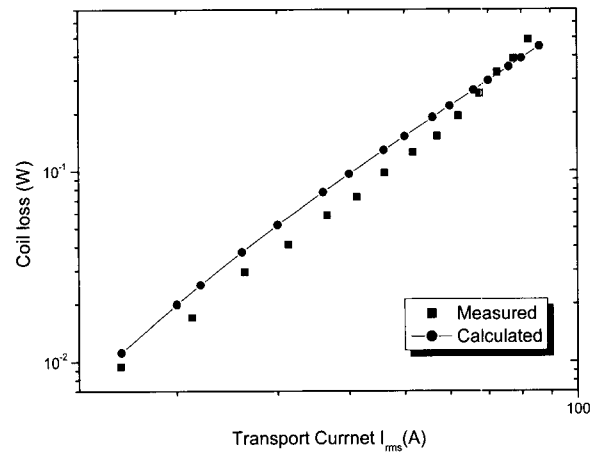


Fig. 8. AC Loss of BSCCO coil.

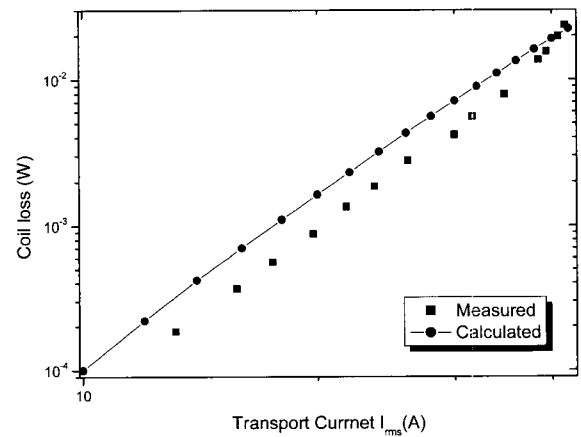


Fig. 9. AC Loss of YBCO coil.

4. 결 론

본 논문에서는 YBCO선재와 BSCCO선재를 이용하여 코일을 설계, 제작하였다. 또한 유한요소법을 사용하여 교류손실을 계산하였다. 그 결과 유한요소법을 사용하여 계산한 결과와 측정값이 큰 차이가 없었다.

또한 BSCCO선재를 이용하여 제작한 코일과 YBCO선재를 이용하여 제작한 선재의 손실을 측정하여 비교하였다. 그 결과 20A의 통전 전류가 흐를 경우 BSCCO 코일보다 YBCO 코일이 10배가량 교류손실이 작았으며 40A의 전류가 흐를 경우 약 7배가량 YBCO 코일의 교류손실이 작았다.

감사의 글

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

참고 문헌

- [1] Alexander Usoskin, et al., "Large Area YBCO-Coated Stainless Steel Tapes With High Critical Currents," IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol. 13, No. 2, pp. 2452-2457, June 2003.
- [2] Seung-wook Lee, Hee-joon Lee, Guesoo Cha, and Ji-kwang Lee, "Comparison of ac losses of HTS pancake winding with single tape and multi stacked tape," IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol. 15, No. 2, pp. 1603-1606, 2003.
- [3] Polak, P. Usak, J. Pitel, L. Jansak, and Z. Timoransiy, "Comparison of Solenoidal and Pancake Model Windings for a Superconducting Transformer," IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol. 11, No. 1, pp. 1478-1481, March 2001.
- [4] J. Ogawa, H. Nakayama, S. Odaka, and O. Tsukamoto, "AC loss characteristics of YBCO coated conductors with Ag protection layer," Physica C, 412-414, pp. 1021-1025, 2004.
- [5] W. T. Norris, "Calculation of Hysteresis Losses in Hard Superconductors Carrying AC: Isolated Conductors and Edges of Thin Sheets," Journal of Phys. D: Applied Phys., Vol. 3, pp. 489-507, 1970.

- [6] Ernst Helmut Brandt, "Type-II super-conductor strip with current in a perpendicular Magnetic," Physical review B, Vol. 48, No. 17, pp. 893-906, November, 1993.

저자 소개



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



이동민(李東民)
1982년 6월 10일생, 2005년 순천향대 공대 정보기술공학부 졸업, 현재 동대학원 석사과정.



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 동대학원 전기공학과 졸업(공학박사), 현재 우석대 전기공학과 부교수.



최홍순(崔鴻洵)
1963년 8월27일생, 1986서울대 공대 전기공학과 졸업, 1988년 동대학원전기공학과 졸업(공학석사), 2000년 동대학원 전기공학과 졸업(공학박사), 현재 성균관대 연구교수.