

BSCCO Tape 선재와 YBCO CC의 외부자장 각도에 따른 자화손실 특성비교

論 文

54B-12-3

Comparison of Magnetization Losses in BSCCO Tape and YBCO CC at Arbitrary Direction of External Magnetic Field

李 志 光[†] · 林 炯 佑^{*} · 朴 明 鎮^{**} · 車 貴 守^{***}

(Ji-Kwang Lee · Hyung-Woo Lim · Myung-Jin Park · Gueesoo Cha)

Abstract - Magnetization loss of high temperature superconducting BSCCO tape and YBCO coated conductor(YBCO CC) is most important issue in the development of superconducting power devices. In this paper, the measured results of magnetization losses in BSCCO tape and YBCO CC are presented and compared with each other. Measurements of magnetization losses are performed under various angles of external magnetic field to consider the anisotropic characteristics of YBCO CC. Also, we present the compared results of magnetization losses measured at arbitrary directional magnetic fields and analyzed with perpendicular magnetic field components of those. The results show that magnetization loss of YBCO CC agree well with the analyzed value by it's perpendicular magnetic field component, but BSCCO tape is not.

Key Words : YBCO CC, BSCCO Tape, 자화손실, 외부수직자장, Arbitrary Directional Magnetic Field

1. 서 론

고온초전도선재는 크게 1세대 초전도선인 BSCCO 테이프 선재와 2세대 초전도선인 YBCO coated conductor(YBCO CC)로 구분하고 있다. 이미 개발 완료되어 사용되고 있는 BSCCO 테이프선재는 120[A] 이상의 통전능력을 갖고 있어 이를 이용한 초전도케이블, 초전도변압기 등의 중규모 초전도전력기기 개발연구가 시도되고 있기는 하지만 테이프 선재의 넓은 면에 수직으로 인가되는 외부자장에 의한 자화손실이 크고, 임계전류밀도가 큰 폭으로 줄어든다는 단점이 있어서 강한 자장이 발생하는 초전도전력기기에 사용하는 데에 어려움이 있다. 이러한 이유 때문에 임계전류밀도가 높고 자장이 인가되어도 전류밀도가 감소하는 정도가 적은 2세대 초전도선을 개발하기 위한 연구가 미국과 일본 등에서 진행되고 있고, 국내에서도 한국전기연구원 등에서 개발을 진행 중이다. YBCO CC는 초전도 선재를 제작하는 방식에 따라 차이는 있지만 1세대 초전도선에 비해서 10배 이상의 전류 용량을 가지고 있으며, 외부에서 자장이 인가되었을 때의 전류밀도 감소도 1/5 이하이기 때문에 상용화되면 1세대 초전도선을 완전히 대체할 것으로 예상하고 있다[1],[2]. 그러나, 현재까지 개발된 YBCO CC는 수직자장에 의한 자화

손실이 BSCCO 선재에 비해 작지 않아 이를 줄이기 위한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 최근의 국제연구동향에서는 저손실 YBCO CC 개발 가능성이 높은 것으로 예측되고 있다. 초전도선재는 교류자장에서 사용될 경우 초전도체의 반자기적 특성으로 인해 필연적으로 히스테리시스손실이 발생하게 되며, 특히 이방성의 전기적 특성을 갖는 고온초전도체의 전류 통전능력을 키우기 위해 테이프 형태로 제작된 고온초전도선재는 선재의 넓은 면에 수직으로 자장이 인가되면 매우 큰 자화손실을 동반하게 된다. 이러한 교류손실은 냉동기의 냉각능력 및 기기 운전효율 등과 직접적으로 관계되므로, 초전도의 교류전력기기에의 응용 가능성을 판단하는 주요 요소라 할 수 있다[3].

초전도전력기기는 일반적으로 초전도선재를 권선한 코일 형태로 사용되며, 코일 여자시 코일을 구성하는 각 초전도선재에는 여러 방향의 자장이 발생하고, 이러한 임의 방향의 자장은 외부 인가 자장처럼 작용하여 코일 각 부분에서 자화손실을 발생시킨다. 특히 초전도선재의 넓은 면에 수직으로 가해지는 자장이 코일 전체의 교류손실을 주도하게 되므로 이러한 수직자장에 의한 초전도선재의 자화손실을 예측하고 가능한 수직자장을 줄일 수 있는 코일구조 설계는 초전도 전력기기 설계의 중요한 고려사항이라 할 수 있다 [4],[5]. 본 논문에서는 BSCCO 테이프 및 YBCO CC 샘플에 대해 외부자장이 샘플의 넓은 면에 30°, 45°, 60°, 90°(수직) 방향으로 인가될 경우의 자화손실과 BSCCO의 0°(수평)방향의 자화손실을 측정하였다. 측정된 자화손실 값들로부터 각 방향 인가자장에 의한 자화손실과 인가된 자장을 분리하여 수직방향 및 수평방향 성분에 의한 자화손실 측정값의 합과 비교하여 각도별로 두 자화손실의 차이를 살펴보았다. YBCO CC의 경우에는 수평방향성분에 의한 자화손실은

† 교신저자, 正 會 員 : 又石大 電氣電子工學科 副教授, 博士
E-mail : jikwang@woosuk.ac.kr

* 正 會 員 : 順天鄉大 情報技術工學部 博士課程

** 正 會 員 : 順天鄉大 情報技術工學部 博士

*** 正 會 員 : 順天鄉大 情報技術工學部 教授, 博士

接受日字 : 2005年 8月 21日

最終完了 : 2005年 10月 8日

YBCO CC의 두께가 $1\mu\text{m}$ 이고, 이를 통과하는 자속량이 매우 작으므로 수직 자화손실에 비해 매우 작아(1% 이내) 무시할 수 있다. 이러한 측정값들을 통한 임의 방향 자장에서의 자화손실 평가는 실제의 초전도 코일에서 자화손실의 계산에 사용될 수 있으므로 초전도 교류전력기기 설계 및 제작 코일의 손실 평가에 유용하게 사용될 수 있다.

2. 자화손실 측정장치 및 해석 모델

표 1은 실험에 사용한 BSCCO 테이프와 YBCO CC의 사양이다. YBCO CC는 금속층인 Ag의 두께는 $1.2\mu\text{m}$ 이고 YBCO 층은 $1\mu\text{m}$, 완충층은 $2.04\mu\text{m}$ 이며 기판층은 $60\mu\text{m}$ 이다. 또한 YBCO Coated Conductor의 폭은 8mm 로 가로대 세로의 비율이 1:8000으로 매우 크다. BSCCO 테이프의 필라멘트 영역은 장축 3.87mm , 단축 0.167mm 의 타원형이다. BSCCO 테이프와 YBCO CC의 임계전류 각각 125A , 166A 로 측정되었다.

표 1 BSCCO tape 및 YBCO coated conductor의 사양
Table 1 Specification of BSCCO tape and YBCO coated conductor

| | | |
|------------|--------------------------------------|---------------------------------------|
| YBCO CC | Ag 층 | $1.2\mu\text{m}$ |
| | YBCO 층 | $1\mu\text{m}$ |
| | 완충층 | $2.04\mu\text{m}$ |
| | 기판층 | $60\mu\text{m}$ |
| | $I_c(77\text{K}, \text{self field})$ | 166A |
| BSCCO tape | 폭 | 4.2mm |
| | 두께 | 0.21mm |
| | 필라멘트 영역 | $3.87\text{mm} \times 0.167\text{mm}$ |
| | $I_c(77\text{K}, \text{self field})$ | 125A |

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.

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

여기서, \vec{E} 은 샘플을 따라 발생된 전계, \vec{H} 는 외부인가자계의 세기이다.

그림 1은 자화손실 측정을 위한 회로도이다. 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 유기전력을 상쇄시킨다.

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

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

여기서, k 는 자장인가용 코일자석의 단위전류당 발생자속밀도를 나타내는 자석상수이고, C_{pu} 는 픽업코일 보정상수, V_s 는 샘플의 체적이다.

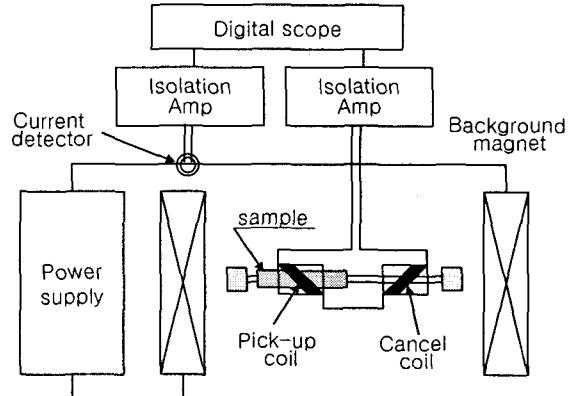


그림 1 임의 방향 인가자장에 의한 고온초전도선재의 자화 손실 측정 회로도

Fig. 1 Experimental circuit for magnetization loss measurement of HTS wire sample

일반적으로 널리 알려진 수직방향 외부자계에 의한 고온초전도 선재의 자화손실 계산은 그림 2의 (a)와 같이 두께가 매우 얇은 strip 형상에 대해서 Brandt가 제시한 strip model을 이용한 식(3)과 같이 계산 할 수 있다[6]. 그러나 식(3)은 두께가 $1\mu\text{m}$ 정도로 매우 얕고, 그 형상이 strip인 YBCO coated conductor에는 적합하나, 그림 2(b)의 BSCCO tape와 같이 YBCO CC에 비해 상대적으로 두께가 매우 크고 초전도 필라멘트들이 이루는 형상이 타원형인 경우에는 적합하지 못하다. 본 논문에서는 식(4)를 이용하여 타원형 선재의 수직방향 자화손실을 계산하였으며[7], 이를 strip model을 이용한 계산치, 측정치와 비교하였다.



그림 2 strip 모델과 타원형 모델

Fig. 2 Strip model and elliptical model

$$Q_m = \frac{2B_m^2}{\mu_0} \frac{\pi w}{2\beta d} \left(\frac{2}{\beta} \ln(\cosh \beta) - \tanh \beta \right) \quad (3)$$

여기서, B_m 는 교류인가자장의 피크치 값을 나타내며, $\beta = \frac{B_m}{B_d}$, $B_d = \mu_0 J_c d / \pi$ 이다.

$$Q_m(B) = M_p B_p(\alpha) q(b) \quad (4)$$

여기서, α 는 타원형 모델의 단축길이에 대한 장축길이의 비를 나타내며, $b = \frac{B_m}{B_p(\alpha)}$ 이다. M_p , $B_p(\alpha)$, $q(b)$ 는 각각 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$M_p = \frac{2}{3\pi} J_c d \quad (4a)$$

$$B_p(\alpha) = \frac{\alpha}{2\sqrt{1-\alpha^2}} \ln \left(\frac{1+\sqrt{1-\alpha^2}}{1-\sqrt{1-\alpha^2}} \right) B_{p,c} \quad (4b)$$

$$q(b) = 4 \left[\frac{2}{1-m_0} ((1-b)^{(1-m_0)} - 1) + b((1-b)^{-m_0} + 1) \right] \quad (\text{for } 0 \leq b < 1) \quad (4c)$$

$$q(b) = 4 \left[b - \frac{2}{(1-m_0)} \right] \quad (\text{for } b \geq 1) \quad (4d)$$

$$\text{단, } m_0 = -\frac{3(1+\alpha)}{4\sqrt{1-\alpha^2}} \ln \left(\frac{1+\sqrt{1-\alpha^2}}{1-\sqrt{1-\alpha^2}} \right) \quad (4e)$$

여기서, 식(4b)의 $B_{p,c} = \frac{\mu_0 J_c d}{\pi}$ 는 완전침투자장을 나타내며, d 는 타원형 모델의 장축의 길이이다.

3. YBCO CC 와 BSCCO 테이프의 자화손실 비교

표1의 BSCCO 테이프와 YBCO CC에 대해 자화손실을 측정하고, 식(3)과 식(4)를 이용한 계산치와 비교하였다. 그림3과 그림4는 각각 BSCCO 테이프선재와 YBCO CC의 수직외부자장 인가시 자화손실 측정치와 계산치를 비교한 결과이다. 그림3의 결과에서 알 수 있듯이 BSCCO 테이프의 경우에는 필라멘트로 구성된 초전도체 영역이 평판(strip)보다는 타원형(ellipse) 형태를 하고 있으므로 식(4)를 이용한 계산결과와 잘 일치함을 알 수 있고. 그림4의 YBCO CC의 경우에는 초전도체 영역이 평판 형태이므로 식(3)의 strip 모델을 이용한 계산결과와 잘 일치함을 알 수 있다.

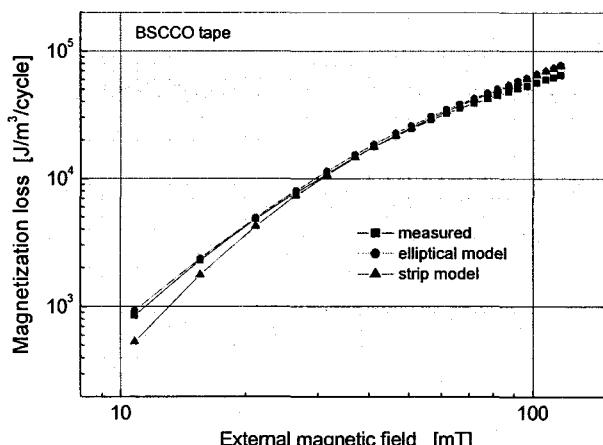


그림 3 BSCCO 테이프의 수직자장에 대한 자화손실 측정값과 계산값 비교

Fig. 3 Measured and calculated magnetization loss for perpendicular magnetic field in BSCCO tape

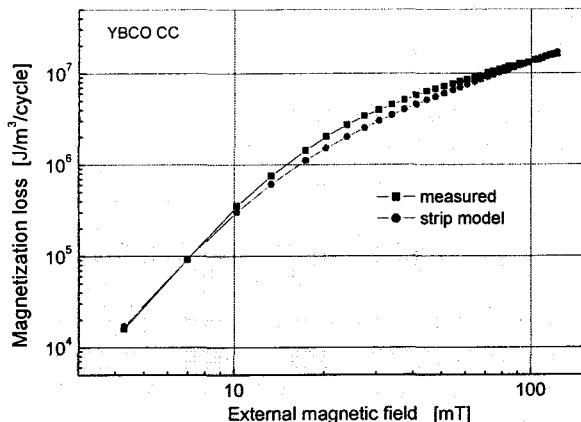


그림 4 YBCO CC의 수직자장에 대한 자화손실 측정값과 계산값 비교

Fig. 4 Measured and calculated magnetization loss for perpendicular magnetic field in YBCO CC

또한, 수직방향의 외부 인가자장에 대해 BSCCO 테이프 선재는 약 45mT, YBCO CC는 20mT 정도에서 자화손실 곡선의 기울기가 변화하는 것을 볼 수 있다. 이때는 초전도 선재의 전 면적을 통해 차폐전류가 흐르고 있음을 나타내며 초전도선재 내부에 자장이 완전히 침투하는 시점이기도 하다. 이 자장을 완전침투자장(full penetration field)라고 한다.

그림 5는 BSCCO 테이프와 YBCO CC의 단위길이당 자화손실 측정값의 비교이다. YBCO CC가 BSCCO 테이프보다 손실이 더 작을 것이라는 YBCO CC 제작연구 초기의 예측과는 달리 손실이 더 큼을 확인할 수 있다. 초전도 선재가 코일의 형태로 권선되어 사용되는 경우 코일 여자시 발생하는 자장은 코일내의 권선된 선재에 대해 여러 방향의 외부 자장으로 작용하게 되므로 임의의 외부자장 인가 각도에 대한 자화손실의 영향을 살펴보았다. 그림6과 그림 7은 외부 인가자장의 각도에 대한 자화손실 측정값이다. 외부 인가자장의 범위는 교류 전력기기에서 주로 나타나는 약 120mT 이내에 대해 측정하였고, Θ는 테이프 선재의 넓은 면에 대한 인가자장의 방향이다.

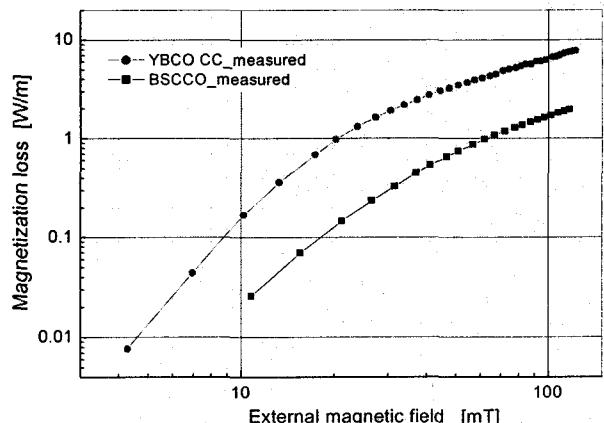


그림 5 BSCCO 테이프와 YBCO CC의 수직자장에 의한 자화손실 측정값 비교

Fig. 5 Comparison of perpendicular magnetization loss generated in BSCCO tape and YBCO CC

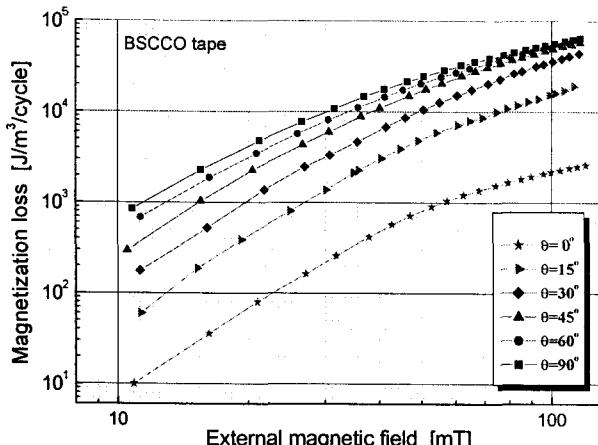


그림 6 BSCCO 테이프의 외부 인가자장의 각도에 따른 자화손실 측정값

Fig. 6 Measured magnetization loss for external magnetic field direction in BSCCO tape

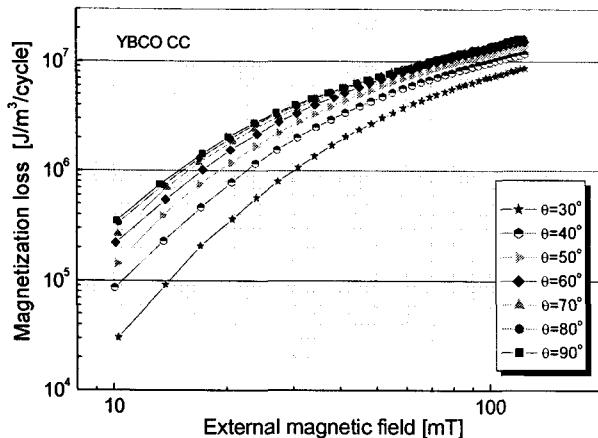


그림 7 YBCO CC의 외부 인가자장의 각도에 따른 자화손실 측정값

Fig. 7 Measured magnetization loss for external magnetic field direction in YBCO CC

측정 결과에서 알 수 있듯이 인가자장의 각도가 수직에 가까울수록, 크기가 클수록 자화손실의 증가비율이 감소함을 알 수 있다. 즉, $\theta=45^\circ \sim 50^\circ$ 이상만 되어도 자화손실은 수직으로 인가된 경우에 근접하여 있음을 알 수 있으며, 이는 인가자장의 수직방향 성분이 자화손실 발생을 주도하고 있다는 것을 나타낸다. 초전도 코일 여자시 코일의 각 부분에서는 선재에 대해 임의 각도의 자장이 외부자장으로서 작용하게 되므로 코일에서 발생하는 자화손실을 시편에서 측정된 자화손실 값을 이용하여 구하기 위해서는 임의 방향의 인가자장에 의한 시편의 손실 측정값이 필요하게 된다. 그러나, 임의방향 자장에 의한 자화손실을 인가자장의 수직, 수평 방향의 자장성분에 의한 자화손실 데이터로 예측할 수 있다면, 시편에 대한 각각의 각도에서의 자화손실 측정없이 수직자장과 수평자장에 의한 자화손실만 측정하면 된다. 여기서는 BSCCO 테이프선재 및 YBCO CC에 대해 측정된 30° , 45° , 60° 의 각도별 자화손실 값과 각 각도별 인가자장의

수직, 수평방향 자장성분 값에 대한 수직(90°) 및 수평(0°) 자화손실 측정값의 합과의 크기 관계를 살펴봄으로서 임의방향 인가자장에 의한 자화손실을 수평, 수직자화손실로서 모의 할 수 있는지 알아본다. 임의 방향 자장의 수직($B_{ex,\perp}$), 수평($B_{ex,\parallel}$) 성분은 식(5)와 같고, 각 성분자장 값에서의 수평, 수직 자화손실 합은 식(6)과 같이 구할 수 있다.

$$B_{ex,\perp} = B_{ex} \sin\theta, \quad B_{ex,\parallel} = B_{ex} \cos\theta \quad (5)$$

$$Q(\theta, B_{ex}) = Q(90^\circ, B_{ex,\perp}) + Q(0^\circ, B_{ex,\parallel}) \quad (6)$$

여기서, B_{ex} 는 외부 인가자장, θ 는 외부 인가자장의 각도로서 그림 1의 표시와 같다. 식(6)에서 $Q(90^\circ, B_{ex,\perp})$ 는 시편의 $\theta=90^\circ$ 의 외부 인가자장에 의한 자화손실 측정값에서 외부자장이 $B_{ex,\perp}$ 일 때의 자화손실 값이고, $Q(0^\circ, B_{ex,\parallel})$ 는 시편의 $\theta=0^\circ$ 의 인가자장에 의한 자화손실 측정값에서 외부자장이 $B_{ex,\parallel}$ 일 때의 자화손실 값이다. BSCCO의 경우 선재 두께가 약 0.21mm이므로 수평자화손실 측정이 가능하나, YBCO CC는 두께가 1μm로서 매우 얇아 수평자장을 정확히 인가할 수 없고 손실도 수직자장에 비해 100분의 1이하로 매우 작아 $Q(0^\circ, B_{ex,\parallel})$ 값은 무시할 수 있으므로 수직자장 성분에 대한 자화손실 $Q(90^\circ, B_{ex,\perp})$ 만으로 분석하였다. 그림 8, 그림 9는 BSCCO 테이프 및 YBCO CC에서 30° , 45° , 60° 의 외부 인가자장에 의한 자화손실 측정값과 자장성분 분리 후 식(6)을 이용하여 구한 자화손실 값의 비교이다. BSCCO 테이프는 외부 인가자장의 각도가 수직방향에 가까울수록, 특히, 60° 이상에서는 그 각도에서의 측정값과 수직, 수평 자장성분에 대한 자화손실 값으로부터 식(6)과 같이 구한 결과의 차이가 거의 없음을 알 수 있고, YBCO CC는 측정된 모든 각도에서 잘 일치함을 알 수 있다.

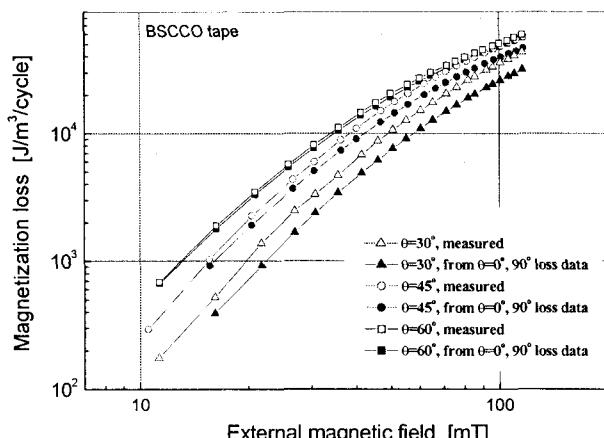


그림 8 BSCCO 테이프의 각도별 자화손실 측정값과 인가자장의 수직, 수평성분 자장에 대한 측정값 합 비교

Fig. 8 Comparison of measured directly at angle and analyzed results by measured magnetization loss at parallel and perpendicular component of the external magnetic field in BSCCO tape

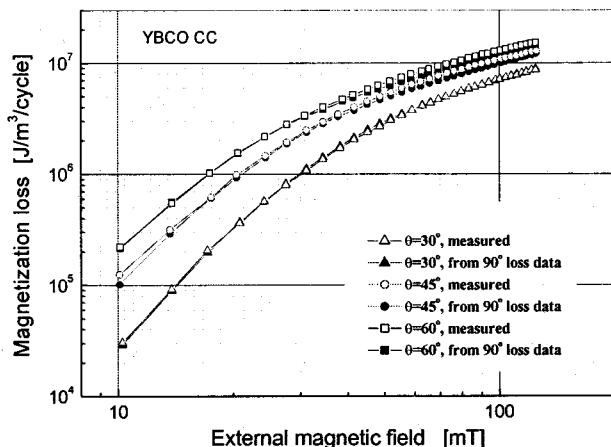


그림 9 YBCO CC의 각도별 자화손실 측정값과 인가자장의 수직성분 자장에서의 자화손실 측정값 비교

Fig. 9 Comparison of measured directly at angle and analized results by measured loss at perpendicular component external magnetic field in YBCO CC

이와 같은 결과는 초전도 선재로 권선한 초전도 코일에서 발생하는 자화손실 예측을 위한 계산에서 BSCCO 코일에서 와는 달리 YBCO CC 코일의 경우에는 코일 각 부분에서의 발생 자장에 의한 자화손실을 수직성분 자장에 의한 자화손실 만으로 평가 할 수 있음을 알 수 있고, YBCO CC 시편의 수직자화손실 측정값만으로도 다른 임의 방향의 인가자장에 의한 자화손실을 예측할 수 있음을 의미한다.

3. 결 론

BSCCO 테이프선재 및 YBCO CC에 대해 외부자장이 0°(수평방향), 30°, 45°, 60°, 90°(수직방향)의 방향으로 인가될 경우의 자화손실을 측정하였다. 측정된 자화손실 값들로부터 임의방향 인가자장에 의한 자화손실과 인가된 자장을 분리하여 수직방향 및 수평방향 성분에 의한 자화손실 측정값의 합과 비교하여 각도별로 두 자화손실의 차이를 살펴보았다. BSCCO 테이프선재는 외부 인가자장의 각도가 60° 이상에서는 그 각도에서의 측정값과 인가자장의 수직, 수평 자장 성분에 대한 자화손실 측정값으로부터 구한 자화손실 평가치가 일치함을 알 수 있었고, YBCO CC는 모든 각도에 대해 잘 일치하므로 YBCO CC 시편의 수직자화손실 측정값만으로도 다른 임의 방향의 인가자장에 의한 자화손실을 예측할 수 있음을 알 수 있었다. 본 논문의 결과는 초전도 코일의 자화손실 평가 및 저손실 코일 설계의 기초 자료로서 사용될 수 있다.

감사의 글

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

참 고 문 헌

- [1] M. Iwakuma et al., "Development of a 1T cryocooler-cooled pulse coil with a Bi2223 superconducting parallel conductor for SMES," IEEE Trans. Applied Superconductivity, vol.9, pp. 928-931, June 1999.
- [2] M. Iwakuma et al., "Ac loss properties of a 1 MVA single-phase HTS power transformer," IEEE Trans. Applied Superconductivity, vol. 11, no. 1, pp. 1482-1485, March 2001.
- [3] M. P. Oomen, J. J. Rabbers, B. ten Haken, J. Rieger and M. Leghissa, "Magnetization loss in stacks of high- Tc superconducting tapes in perpendicular magnetic field," Physica C .361, pp. 144-148, 2001.
- [4] T. Chiba, Q. Li, S. P. Ashworth, and M. Suenaga, "Angular dependence of ac losses at power frequencies for a stack of Bi-2223/Ag tapes," IEEE Trans. Applied Superconductivity, vol. 9, no. 2, pp. 2143-2146, June 1999.
- [5] Y. Fukuda, K. Toyota, K. Kajikawa, M. Iwakuma, and K. Funaki, "Field angle dependence of ac losses in stacked Bi-2223 Ag-sheathed tapes," IEEE Trans. Applied Superconductivity, vol. 13, no. 2, pp. 3610-3613, June 2003.
- [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.
- [7] Bennie ten Haken, Jan-Jaap Rabbers, Herman H.J. ten Kate, "Magnetization and AC loss in a superconductor with an elliptical cross-section and arbitrary aspect ratio", Physica C 337, 156-164, 2002.

저 자 소 개



이 지 광 (李志光)

1966년 6월 1일생, 1989년 서울대 전기공학과 졸업, 1997년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사), 현재 우석대학교 전기공학과 부교수.

Tel : 063-290-1476

E-mail : jikwang@woosuk.ac.kr

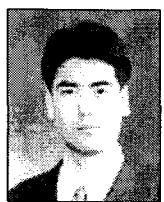


임 형 우(林炯佑)

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

Tel : 041-530-1334

E-mail : super@sch.ac.kr



박 명 진 (朴 明 隊)

1973년 12월 7일생. 1999년 순천향대 전기 공학과 졸업, 2001년 동국대학교 전기공학과 졸업(석사), 현재 순천향대 전기공학과 박사과정.

Tel : 041-530-1334

E-mail : pj1973@hanmail.net



차 귀 수 (車 貴 守)

1956년 7월 8일생. 1978 서울대 공대 공업 교육학과 졸업, 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 순천향대 정보기술공학부 교수

Tel : 041-530-1334

E-mail : gsoocha@sch.ac.kr