

YBCO CC 적층 및 BSCCO tape 적층선재에서 수직자화 손실 값을 이용한 임의 방향 자화손실 평가

論 文
56-2-9

Magnetization Loss Characteristics at Arbitrary Directional Magnetic Field by Perpendicular Magnetization Loss in YBCO CC and BSCCO Stacked Conductors

李志光[†] · 林炯佑^{*} · 朴明鎭^{**} · 車貴守^{***}
(Ji-Kwang Lee · Hyoung-Woo Lim · Myung-Jin Park · Guesoo 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 under various angles of external magnetic field in BSCCO tape stacked conductors and YBCO CC stacked conductors are presented and compared with each other. 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 losses of YBCO CC single and stacked conductors agree well with the analyzed value by it's perpendicular magnetic field component, but BSCCO single and stacked conductors are not.

Key Words : YBCO CC, BSCCO tape, stacked conductor, magnetization loss, perpendicular magnetic field, arbitrary directional magnetic field

1. 서 론

초전도선재는 교류자장에서 사용될 경우 초전도체의 반자극 특성으로 인해 필연적으로 히스테리시스손실이 발생하게 되며, 특히 이방성의 전기적 특성을 갖는 고온초전도체의 전류 통전능력을 키우기 위해 테이프나 박막 형태로 제작된 고온초전도선재는 선재의 넓은 면에 수직으로 자장이 인가되면 매우 큰 자화손실을 발생시키고, 코일형태로의 전류용용 시 초전도코일 전체의 교류손실을 주도하게 되므로 이러한 수직자장에 의한 자화손실(이하 수직 자화손실)을 최소화하는 것은 초전도 교류전력기기 응용의 중요한 고려사항이라 할 수 있다[1].

고온초전도선재는 크게 1세대 초전도선인 BSCCO 테이프 선재와 2세대 초전도선인 YBCO coated conductor(YBCO CC)로 구분하고 있다. BSCCO 테이프선재는 120[A] 이상의 통전능력을 갖고 있어 이를 이용한 초전도전력기기 개발연구가 시도되고 있으나, 수직 자화손실이 크고 임계전류밀도가 큰 폭으로 줄어든다는 단점이 있어서 강한 자장이 발생하는 초전도전력기기에 사용하는 데에 어려움이 있다. 2세대 초전도선인 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 1세

대 초전도선을 완전히 대체할 것으로 예상하고 있다[2],[3].

대용량의 초전도전력기기에서는 대전류 통전이 필요하고, 단일선재로서는 통전요구 전류용량을 만족할 수 없으므로 여러 개의 선재를 덧붙인 적층선재를 사용하여 솔레노이드나, 팬케익 형태로 권선한 코일이 이용된다[4]. 또한, 단일선재로 코일을 권선하였다 할지라도 여러 층으로 권선된 코일은 여자 시 발생된 자장의 입장에서 보면 교류손실 측면에서는 적층된 선재를 사용한 경우와 같이 생각할 수 있다.

초전도코일에서 권선을 구성하는 선재들에 흐르는 교류전류에 의해 발생하는 교류자장은 권선내의 각각의 선재에 임의 방향의 외부인가자장으로 작용하여 자화손실을 발생시키므로 초전도코일에서의 교류손실을 평가하고 예측하기 위해서는 임의방향 자장에 의한 적층선재의 자화손실에 대한 연구가 필요하다[5],[6]. 그러나 초전도코일의 권선부에서 발생하는 모든 자장 방향에 대해 권선에 사용된 초전도선재 샘플에서의 자화손실을 측정하는 일은 매우 번거로우며 측정한다 할 지라도 코일손실 계산에의 적용도 쉽지 않다. 수직 자화손실의 측정값을 이용하여 임의방향 자장에 의한 자화손실을 평가할 수 있다면 초전도 코일의 교류손실 평가는 훨씬 쉽게 접근할 수 있을 것이다.

본 논문에서는 고온초전도선재의 외부인가자장의 방향 및 크기에 따른 자화손실을 측정하고, 측정된 자화손실 값들로부터 각 방향 인가자장에 의한 자화손실과 인가된 자장의 수직방향 자장에 의해 발생하는 수직 자화손실 값을 비교하여 각도별로 두 자화손실의 차이를 살펴보고자 한다. 이를 위하여 YBCO CC 단일선재, 2적층, 3적층, 4적층선재 및 BSCCO tape 단일선재, 4적층선재 샘플에 대해 외부자장이 샘플의 넓은 면에 30°, 45°, 60°, 90°(수직)방향으로 인가될 경우의 자화손실을 측정하였다. 이러한 측정값들을 통한 임의방향 자장에서의 자화손실 평가는 실제의 초전도 코일에서 자화손실의 계산에 사용될 수 있으므로 초전도 교류전력

[†] 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

^{**} 正會員 : 基礎電力研究員 專任研究員 博士

^{***} 正會員 : 順天鄉大 情報技術工學部 教授, 博士

接受日字 : 2006年 10月 10日

最終完了 : 2006年 12月 18日

기기 설계 및 제작 코일의 손실 평가에 유용하게 사용될 수 있다.

2. 자화손실 측정 및 결과분석

2.1 측정 및 분석방법

표 1은 실험에 사용한 단일 YBCO CC와 BSCCO tape의 사양이고, 그림 1은 실험 샘플 중 YBCO CC와 BSCCO tape 4적층선재의 단면을 보여준다. YBCO CC에서 금속층인 Ag의 두께는 1.2μm이고 YBCO 층은 1μm, 완충층 2.04μm이며 기관층 60μm이다. YBCO Coated Conductor의 폭은 8mm로 가로대 세로의 비율이 8000 : 1로 매우 크다. BSCCO 테이프의 필라멘트 영역은 장축 3.87mm, 단축 0.167mm의 타원형이다. 단일 BSCCO 테이프와 YBCO CC의 임계전류 각각 125A, 166A로 측정되었다.

표 1 실험에 사용된 BSCCO tape 및 YBCO CC의 사양
Table 1 Specification of BSCCO tape and YBCO CC

YBCO CC	Ag층	1.2μm
	YBCO층	1μm
	완충층	2.04μm
	기관층	60μm
	Ic(77K,self field)	166A
BSCCO tape	폭	4.2mm
	두께	0.21mm
	필라멘트 영역	3.87mm×0.167mm
	Ic(77K,self field)	125A

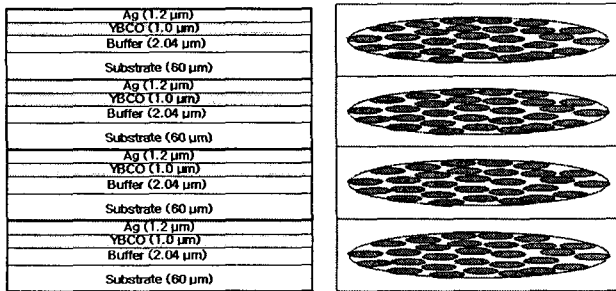


그림 1 YBCO CC 4적층선재 및 BSCCO 4적층선재
Fig. 1 Conceptual cross-sectional view of YBCO 4-stacked conductor and BSCCO 4-stacked conductor

고온초전도선재의 자화손실은 균일한 외부자장을 고온초전도선재의 샘플에 인가할 때 발생하는 에너지의 유출입으로부터 얻을 수 있으므로 1주기 당, 단위체적당 자화손실은 식(1)과 같이 표현 할 수 있다.

$$Q_m = \frac{1}{V_s} \int_0^{1/f} \oint_s (\vec{E} \times \vec{H}) \cdot d\vec{s} dt \quad (1)$$

여기서, \vec{E} 은 샘플을 따라 발생된 전계, \vec{H} 는 외부 인가

자장의 세기이다. 식(1)을 외부 인가자장에 의해 초전도체에서 발생된 자화량 m 과 외부인가자장의 세기 H 로 표현하면 초전도체에서 발생하는 자화손실은 초전도체의 반자성 특성에 의한 히스테리시스 손실이므로 히스테리시스 루프의 면적을 계산하는 식(2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$Q_m = \frac{1}{V_s} \oint H(t) \cdot \dot{m}(H) = \frac{1}{V_s} \int_0^{1/f} H(t) \cdot \dot{m}(H) dt \quad (2)$$

초전도체의 발생 자화량의 시간변화는 pick-up 코일에 유도되는 전압으로 측정되고, 외부인가자장의 세기는 인가자장을 만들어 주는 자장인가용 마그네트의 인가전류를 측정함으로써 알 수 있으므로 식(2)를 측정된 전압, 전류 신호를 이용하여 고온초전도선재의 1주기 당, 단위체적 당 자화손실로 표현하면 식(3)을 얻을 수 있다.

$$Q_m = \frac{C_{pu} k}{V_s} \int_0^T v(t) i(t) dt \quad (3)$$

여기서, k 는 자장인가용 코일자석의 단위 전류당 발생 자속밀도를 나타내는 자석상수이고, C_{pu} 는 pick-up 코일 보정상수, V_s 는 샘플의 체적이다.

초전도선에서 발생하는 자화손실 측정을 위해 직사각형 형태의 pick-up 코일 및 cancel 코일이 주로 사용되어 왔으나, 직사각형 pick-up 코일 내에 짧은 시편이 위치할 경우 시편의 길이방향의 양쪽 끝부분들(edges)에서의 자화량까지 같이 측정되게 된다. 시편 끝부분의 자화손실은 실제의 전력기기에서 사용되는 장선의 선재에서의 자화손실에 대해서는 오차를 의미하기 때문에 끝부분의 자화량을 배제한 단위길이당의 자화손실이 좀 더 정확한 측정값이라 할 수 있다. 본 논문에서는 일본 요코하마 대학의 연구진에 의해 새롭게 제시된 pick-up 및 cancel 코일이 사선 모양으로 배치되어 시편이 관통하는 LPC(linked pick-up coil) 측정법을 이용하여 자화손실을 측정하였다[7]. 그림 2는 자화손실 측정을 위한 실험 회로도를 보여준다.

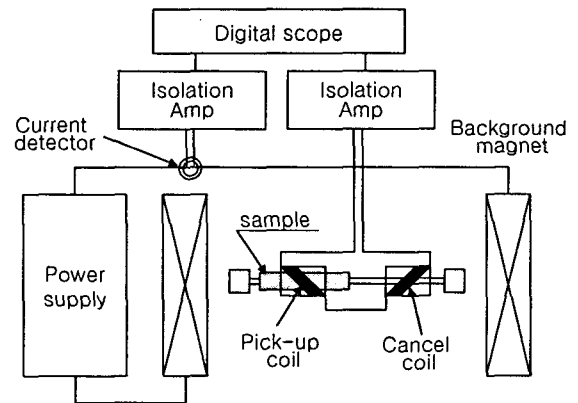


그림 2 임의 방향 인가자장에 의한 고온초전도선재의 자화손실 측정 회로도

Fig. 2 Experimental circuit for magnetization loss measurement

LPC 측정법은 샘플은 픽업코일 내부에 위치하며, 외부자장이 인가되는 경우에 픽업코일에 유기되는 전압은 초전도선재 샘플에서 발생하는 자장과 외부자장과의 합성에 의해 나타나므로 초전도선재의 샘플에서 발생하는 자장만을 얻기 위해 픽업코일과 동일한 턴 수의 캔슬코일을 픽업코일에 연결해 외부자장에 의한 유기기전력을 상쇄시킨다.

초전도 코일 여자 시 코일의 각 부분에서는 선재에 대해서 임의 각도의 자장이 외부자장으로서 작용하게 되므로 코일에서 발생하는 자화손실을 샘플에서 측정된 자화손실 값을 이용하여 구하기 위해서는 임의 방향의 인가자장에 의한 샘플의 손실 측정값이 필요하게 된다. 그러나, 임의방향 자장에 의한 자화손실을 인가자장의 수직, 수평 방향의 자장성분에 의한 자화손실 데이터로 예측할 수 있다면, 샘플에 대한 각각의 각도에서의 자화손실 측정 없이 수직 자화손실과 수평 자화손실만 측정하면 된다. 임의방향 인가자장에 의한 자화손실을 수직 자화손실로서 모의 할 수 있는지 알아보기 위해 측정데이터에 적용한 손실 관계는 다음과 같다.

그림 3에서 보는 것처럼 임의 방향 자장의 수직($B_{ex,\perp}$), 수평($B_{ex,\parallel}$) 성분은 식(4)와 같고, 각 성분자장 값에서의 수평, 수직 자화손실 합은 식(5)와 같이 구할 수 있다.

$$B_{ex,\perp} = B_{ex} \sin\theta, \quad B_{ex,\parallel} = B_{ex} \cos\theta \quad (3)$$

$$Q(\theta, B_{ex}) = Q(90^\circ, B_{ex,\perp}) + Q(0^\circ, B_{ex,\parallel}) \quad (4)$$

여기서, B_{ex} 는 외부 인가자장, θ 는 외부 인가자장의 각도로서 그림 3의 표시와 같다.

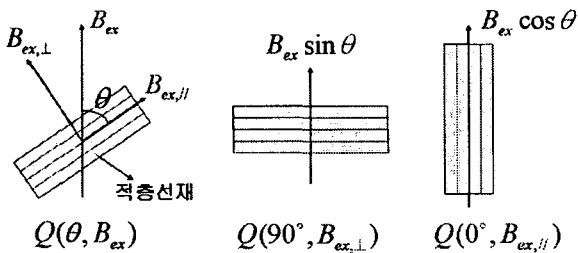


그림 3 임의방향 자장과 수직자장성분, 수평자장성분의 크기관계 및 손실관계

Fig. 3 External magnetic field and magnetization loss relation for analysis in arbitrary, perpendicular and parallel magnetic field component

식(4)에서 $Q(90^\circ, B_{ex,\perp})$ 는 $\theta=90^\circ$ 의 자화손실 측정값에서 외부 인가자장이 $B_{ex,\perp}$ 일 때의 자화손실 값이고, $Q(0^\circ, B_{ex,\parallel})$ 는 샘플의 $\theta=0^\circ$ 의 자화손실 측정값에서 외부 인가자장이 $B_{ex,\parallel}$ 일 때의 자화손실 값이다. 테이프형태의 BSCCO 선재, 박막형태의 YBCO CC의 경우에는 수평 자화손실은 두께가 매우 얇고, 이를 통과하는 자속량이 작아 수직 자화손실에 비해 매우 작으므로 무시할 수 있다. 본 논문에서는 수평 자화손실을 무시하고 수직 자화손실만을 고려하였다.

2.2 측정결과 및 임의방향 자화손실 평가

고온초전도선재에서 임의방향 인가자장에 의해 발생하는 자화손실과 임의방향 인가자장 중 수직방향성분 자장에 의한 자화손실과 비교하기 위하여 YBCO CC 단일선재 및 적층선재와 BSCCO 단일 및 적층선재에 대해 측정된 $30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ 의 각도별 자화손실 값과 각 각도별 인가자장의 수직방향 자장성분 값에 대한 수직(90°) 자화손실 측정값과의 크기 관계를 살펴보았다. 측정시 인가된 교류자장의 주파수는 60[Hz]이다. 본 논문의 측정값의 타당성 검토를 위해서는 일반적으로 널리 인정되어 사용되는 수식에 따른 해석적 결과와 또는 수치적 결과와의 비교검토가 필요하다. 그러나, YBCO CC 단일 선재의 경우에는 브란트식으로 잘 알려진 Brandt and Indenbom이 제시한 strip 모델식으로 비교검토할 수 있으나, 평판이 쌓여있는 형태의 적층선재에는 적용될 수 없다. 적층선재의 경우에 대한 해석식은 BSCCO, YBCO 어느 것에 대해서도 지금까지 알려진 바 없다. 또한, 유한요소법(FEM)을 이용한 수치적 방법의 경우에는 BSCCO 선재에 대해서는 단일이나 적층선재 모두 가능하나, YBCO CC는 종횡비가 매우 커서 메쉬(mesh)형성 자체가 어렵워 해석이 어려운 실정이다. 본 논문의 자화손실 측정값의 타당성은 이미 게재된 논문을 통해 검증되었다고 생각된다[8],[9].

2.2.1 YBCO CC 단일 및 적층선재의 자화손실

그림 4는 YBCO CC 단일선재, 2, 3, 4적층선재에 대한 수직 자화손실 측정결과를 자화손실 밀도(단위체적당 자화손실)로 비교하여 나타낸 결과이다. BSCCO 테이프 선재에서와 마찬가지로 적층 개수가 증가할수록 적층에 의한 자기차폐 영향에 의한 손실밀도 감소 효과가 커짐을 알 수 있으며, 그래프에서 손실 증가 패턴이 변하는(기울기가 변하는) 외부 인가자장의 크기, 즉 완전침투자장이 적층개수 증가에 따라 커짐을 확인할 수 있다. 단일선재의 수직방향의 외부자장이 인가되는 경우 약 20mT 정도에서 자화손실 곡선의 기울기가 변화하는 것을 볼 수 있다. 이때는 초전도선재의 전면적을 통해 차폐전류가 흐르고 있음을 나타내며 초전도선재 내부에 자장이 완전히 침투하는 시점이기도 하다. 이 자장을 완전침투자장(full penetration field)라고 한다. 적층의 효과는 초전도체의 반자성 특성으로 이러한 완전침투자장의 크기를 증가시키는 역할을 하게 된다. 적층 수가 증가할수록 이러한 현상은 두드러지게 나타난다. 차폐효과 영향으로 적층선재의 안쪽에 위치한 선재들은 바깥쪽에 위치한 선재들 보다 같은외부자장이 인가되더라도 각각의 선재에서는 더욱 작은 영역에서 차폐전류가 흐르게 되어 선재내부에 전류밀도 분포가 0인 영역이 더욱 커지게 되어 상대적으로 자화손실의 크기가 감소하게 된다.

그림 5는 YBCO CC 단일선재에 대해 외부자장이 $30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ 의 방향으로 가해지고 있을 때의 자화손실 측정값과, 각 방향 인가자장의 경우에 인가자장의 수직방향성분 자장 값에 대한 90° (수직)방향에서의 자화손실 측정값을 비교하였다. 즉, 그림 3에서 이 가장 왼쪽의 경우에서의 자화손실 측정값 $Q(\theta, B_{ex})$ 과 가운데의 경우에서의 자화손실 측정값 $Q(90^\circ, B_{ex} \sin\theta)$ 을 비교한 결과이다. 그림 6, 그림 7, 그림 8은 각각 2적층, 3적층, 4적층선재에 대한 측정결과 비교이다. 결과에서 알 수 있듯이 거의 모든 각도 및 외부자장의 크기에 대해 비교결과가 잘 일치함을 알 수 있다.

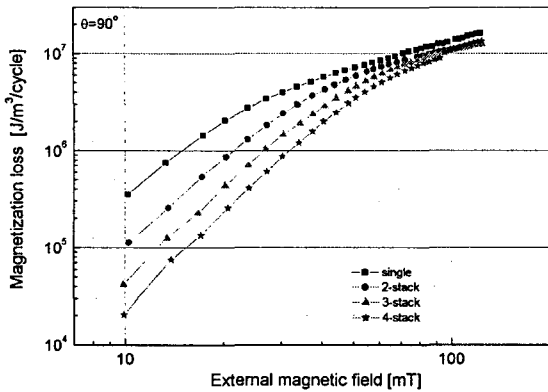


그림 4 YBCO CC 단일, 2,3,4적층선재의 수직 자화손실 측정결과

Fig. 4 Measured perpendicular magnetization loss in YBCO CC single and 2,3,4 stacked conductor

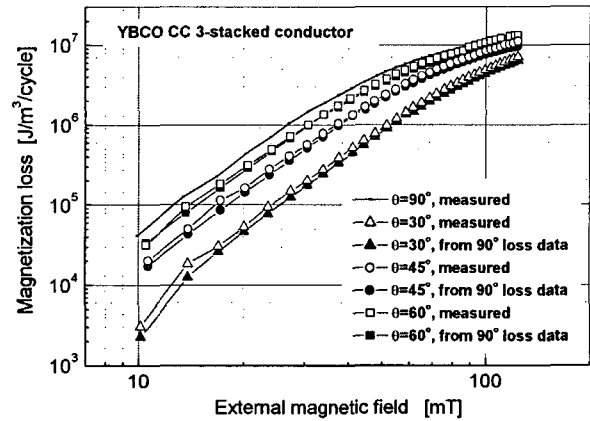


그림 7 YBCO 3적층선재의 각도별 자화손실 측정값과 인가 자장의 수직성분 자장에서의 자화손실 측정값 비교

Fig. 7 Comparison of the measured results directly at the angle and results at perpendicular component of the external field in YBCO CC 3-stacked conductor

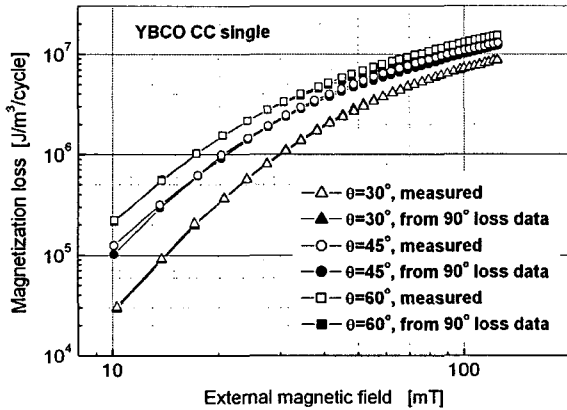


그림 5 YBCO CC 단일선재의 각도별 자화손실 측정값과 인가 자장의 수직성분 자장에서의 자화손실 측정값 비교

Fig. 5 Comparison of the measured results directly at the angle and the measured results at perpendicular component of the external field in single YBCO CC

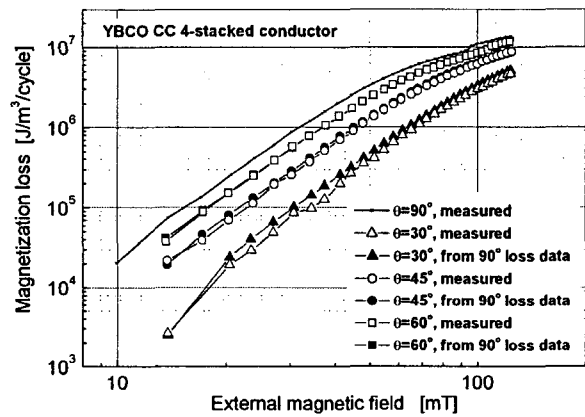


그림 8 YBCO 4적층선재의 각도별 자화손실 측정값과 인가 자장의 수직성분 자장에서의 자화손실 측정값 비교

Fig. 8 Comparison of the measured results directly at the angle and results at perpendicular component of the external field in YBCO CC 4-stacked conductor

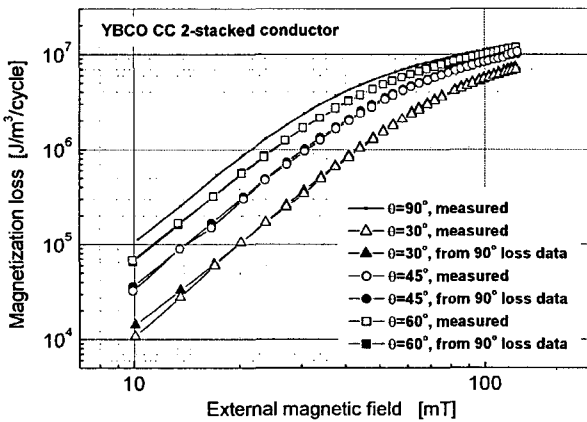


그림 6 YBCO 2적층선재의 각도별 자화손실 측정값과 인가 자장의 수직성분 자장에서의 자화손실 측정값 비교

Fig. 6 Comparison of the measured results directly at the angle and results at perpendicular component of the external field in YBCO CC 2-stacked conductor

2.2.2 BSCCO tape 단일 및 적층선재의 자화손실

그림 9와 그림 10은 각각 단일 BSCCO 테이프와 4적층선재에 대해 외부 인가자장의 각도를 달리하여 외부자장의 크기를 증가시키면서 자화손실을 측정한 결과이다. 측정 결과에서 알 수 있듯이 인가자장의 각도가 수직에 가까울수록, 크기가 클수록 자화손실의 증가비율이 감소함을 알 수 있으며 수직 자화손실에 대해 같은 외부자장의 크기에서 수평 자화손실은 측정범위(10mT~120mT) 내에서 약 1.0~1.5% 정도에 해당한다는 것을 알 수 있다. 이는 앞에서 가정했던 수평 자화손실에 대해서는 무시할 수 있음을 보여준다. 그림 11과 그림 12는 그림 9와 그림 10의 측정결과로부터 식(4)와 식(5)을 이용하여 외부자장이 30°, 45°, 60°의 방향으로 가해지고 있을 때의 자화손실 측정값과, 각 방향 인가자장의 경우에 인가자장의 수직방향성분 자장 값에 대한 90°(수직)방향에서의 자화손실 측정값을 비교한 결과이다. 결과에서 알 수 있듯이 외부 인가자장의 각도가 수직방향에 가

카울수록 그 각도에서의 측정값과 수직 자장성분에 대한 자화손실 값의 결과가 차이가 줄어들음을 알 수 있고, 60° 이상에서는 거의 일치함을 알 수 있다.

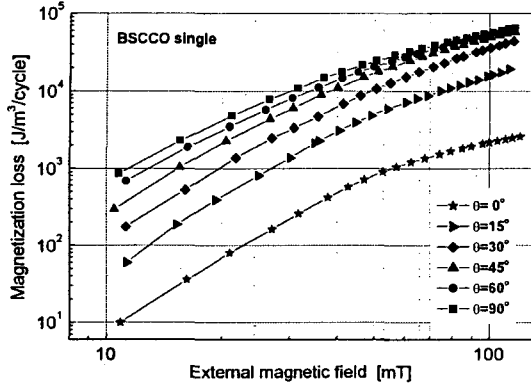


그림 9 단일 BSCCO 테이프의 외부 인가자장의 각도에 따른 자화손실 측정값

Fig. 9 Measured magnetization loss for external magnetic field direction in single BSCCO tape

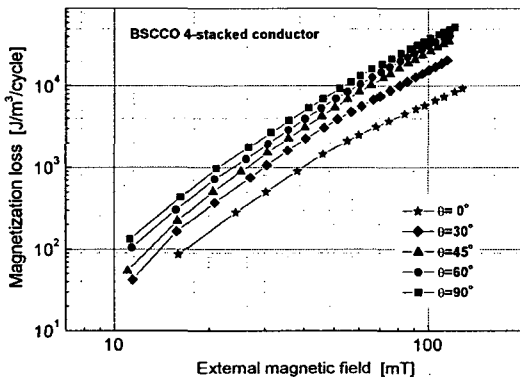


그림 10 BSCCO 4적층선재의 외부 인가자장의 각도에 따른 자화손실 측정값

Fig. 10 Measured magnetization loss for external magnetic field direction in BSCCO 4-stacked conductor

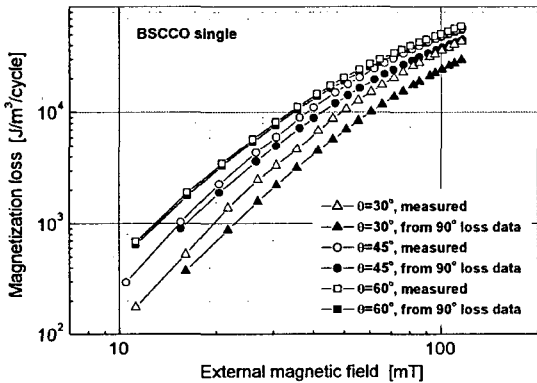


그림 11 단일 BSCCO 테이프의 각도별 자화손실 측정값과 인가자장의 수직성분 자장에 대한 측정값 비교

Fig. 11 Comparison of measured directly at angle and analyzed results by measured magnetization loss in single BSCCO tape

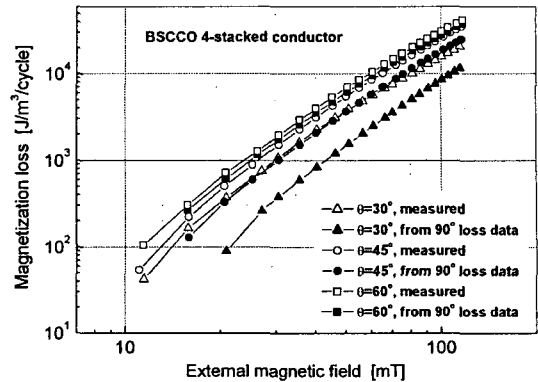


그림 12 BSCCO 테이프의 각도별 자화손실 측정값과 인가자장의 수직성분 자장에 대한 측정값 비교

Fig. 12 Comparison of measured directly at angle and analyzed results by measured magnetization loss in BSCCO tape

2.2.3 임의방향 자화손실에 대한 수직 자장성분

인가자장 50mT~120mT 범위에서 그림 5, 그림 8, 그림 11, 그림 12의 결과로부터 YBCO, BSCCO 단일선재 및 4적층선재에 대해 30°, 45°, 60°의 외부 인가자장에 의한 자화손실 측정값과 자장성분 분리 후 수직방향 외부자장에 의한 자화손실 측정치를 이용해 식(6)과 같이 구한 자화손실 값의 비율을 나타낸 결과는 각각 그림 13, 그림 14, 그림 15와 같다.

$$loss\ ratio = \frac{Q(90^\circ, B_{ex, \perp})}{measured\ loss\ at\ \theta} \quad (5)$$

결과에서 알 수 있듯이, BSCCO 테이프선재에 대한 자화손실에서는 두 값이 차이가 있어서 임의방향 자장에 의한 자화손실을 수직 자화손실로서 예측하는 데 있어 60° 이하의 외부자장에 대해서는 잘 일치하지 않음을 알 수 있다.

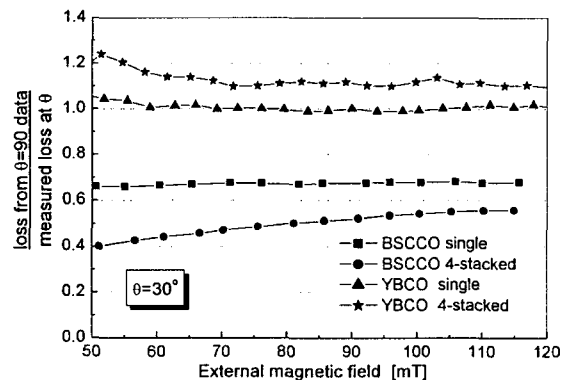


그림 13 BSCCO 와 YBCO 단일 및 4적층선재에서 자화손실 측정값과 인가자장의 수직성분자장에 의한 자화손실의 비율(theta = 30°)

Fig. 13 Loss ratio for measured results directly at the angle and the measured results at perpendicular component of the external field in single and 4-stacked conductor of BSCCO tape and YBCO CC

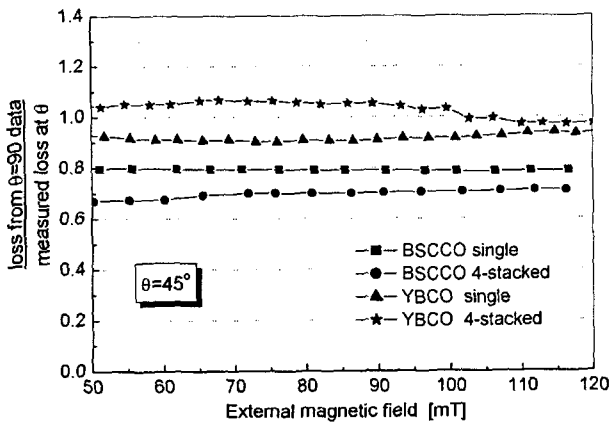


그림 14 BSCCO 와 YBCO 단일 및 4적층선재에서 자화손실 측정값과 인가자장의 수직성분자장에 의한 자화손실의 비율($\theta = 45^\circ$)

Fig. 14 Loss ratio for measured results directly at the angle and the measured results at perpendicular component of the external field in single and 4-stacked conductor of BSCCO tape and YBCO CC

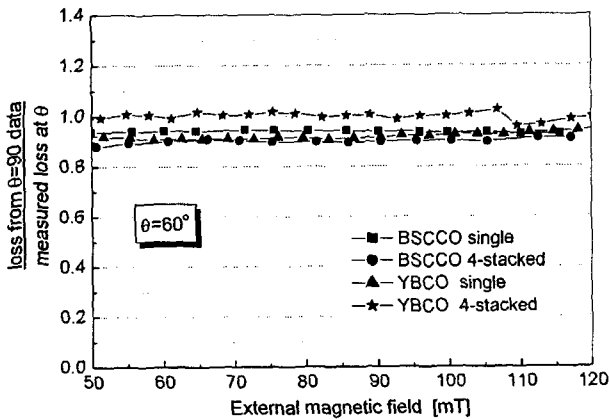


그림 15 BSCCO 와 YBCO 단일 및 4적층선재에서 자화손실 측정값과 인가자장의 수직성분자장에 의한 자화손실의 비율($\theta = 60^\circ$)

Fig. 15 Loss ratio for measured results directly at the angle and the measured results at perpendicular component of the external field in single and 4-stacked conductor of BSCCO tape and YBCO CC

BSCCO tape 선재는 초전도 코어 영역이 타원형 형태로 되어 있고 tape의 종횡비(폭-두께 비율)가 20정도로서 YBCO CC의 8000에 비해 두께를 무시할 수 없게 되어 수직자장과 동일한 수직성분을 갖는 외부자장의 인가각도가 작을수록 수직자장만 인가되는 경우에 비해 차폐전류가 흐르는 영역의 크기가 커져서 두 측정값 사이에 차이가 발생하는 것으로 판단된다. 적층선재의 경우에는 이에 더하여 수직자장이 인가될 때 각 선의 초전도체의 반자성에 의한 자장차폐 효과에 의해 바깥쪽 선과선 사이에 위치한 내부 선들에서 자속밀도가 감소하지만, 인가자장의 각도가 줄어들게 되면 인접선들 상호간의 반자성에 의한 자장차폐가 각

선들에 대해서는 외부인가자장의 증가 효과를 가져오게 되어 두 측정값 사이에 차이가 발생한다고 생각된다. 이에 비해 YBCO CC의 경우에는 두 결과가 잘 일치함을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 초전도 선재로 권선한 초전도 코일에서 발생하는 자화손실 예측을 위한 계산에서 BSCCO 코일에서와는 달리 YBCO CC 코일의 경우에는 코일 각 부분에서의 발생 자장에 의한 자화손실을 수직성분 자장에 의한 자화손실만으로 평가할 수 있음을 알 수 있고, YBCO CC 샘플의 수직 자화손실 측정값만으로도 다른 임의 방향의 인가자장에 의한 자화손실을 예측할 수 있음을 의미한다.

3. 결 론

YBCO CC 와 BSCCO tape 단일 및 적층선재에 대해 외부자장이 $30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ (수직방향)의 방향으로 인가될 경우의 자화손실을 측정하였다. 측정된 자화손실 값들로부터 임의방향 인가자장에 의한 자화손실과 인가된 자장을 분리하여 수직방향 성분에 의한 자화손실 측정값과 비교하여 각 도별로 두 자화손실의 차이를 살펴보았다. BSCCO 선재에 대해서는 외부자장의 인가 각도가 60° 이하로 낮은 경우에는 수직 자화손실만으로 근사화하기에는 오차가 매우 크므로 코일 설계시 고려되어야 할 것이다. YBCO CC 및 적층선재의 자화손실은 모든 각도에 대해 잘 일치하므로 YBCO CC 샘플의 수직 자화손실 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 초전도응용기술개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- [1] M. Iwakuma et al., "Ac loss properties of a 1 MVA single-phase HTS poer transformer," IEEE Trans. Applied Superconductivity, vol. 11, no. 1, pp. 1482-1485, March 2001.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] M. P. Oomen, J. J. Rabbers, B. ten Haken, J. Rieger and M. Leghissa, "Magnetization loss in stacks of high- T_c superconducting tapes in perpendicular

magnetic field," Physica C .361, pp. 144-148, 2001.

- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] Z. Jiang and N. Amemiya, "An experimental method for total AC loss measurement of high Tc superconductors," Superconducting Science and Technology, vol. 17, pp.371-379, 2004.
- [8] 이지광 외, "BSCCO Tape 선재와 YBCO CC의 외부자장 각도에 따른 자화손실 특성비교" 전기학회논문지, 54B권 12호, pp.586-591, 2005.
- [9] 박명진 외, "적층 배열형상에 따른 BSCCO 적층선재의 자화손실 특성 수치해석 및 측정" 전기학회논문지, 55B권, 2호, pp.83-87, 2006.



박명진 (朴明陣)

1973년 12월 7일생. 1999년 순천향대 전기공학과 졸업, 2005년 순천향대학교 정보기술공학부 졸업(박사), 현재 기초전력연구원 전임연구원.

Tel : 041-530-1334

E-mail : pj1973@hanmail.net



차귀수 (車貴守)

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

Tel : 041-530-1334

E-mail : gsoocha@sch.ac.kr

저 자 소 개



이지광 (李志光)

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

Tel : 063-290-1476

E-mail : jikwang@woosuk.ac.kr



임형우 (林炯佑)

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

Tel : 041-530-1334

E-mail : super@sch.ac.kr