

## 자화손실 측정값으로부터 추정된 YBCO CC의 임계전류밀도 평가

### Estimation of critical current density of a YBCO coated conductor from a measurement of magnetization loss

이세연<sup>1</sup>, 박상호<sup>1</sup>, 김우석<sup>2</sup>, 이지광<sup>3\*</sup>, 최경달<sup>1</sup>

S. Lee<sup>1</sup>, S.H. Park<sup>1</sup>, W.S Kim<sup>2</sup>, J.K. Lee<sup>3\*</sup>, K. Choi<sup>1</sup>

**Abstract:** For large scale power applications of HTS conductor, it is getting more important to have a stacked HTS coated conductor with low loss and large current capacity. But it was not easy to measure some electric properties. Stabilizer free YBCO CC for striated/ stacked conductors is easily burned out during the measurement of the critical current density because it has no stabilizer and it is difficult to set-up the current lead and voltage taps because it has many pieces of YBCO CC in a conductor. Instead of direct measuring the critical current of a stacked HTS coated conductor, indirect estimation from measuring a magnetization loss of HTS coated conductor could be useful for practical estimation of the critical current. The magnetization loss of a superconductor is supposed to be affected by a full penetrating magnetic field, and it tends to show an inflection point at the full penetrating magnetic field when we generate the graph of magnetization loss vs. external magnetic field. The full penetrating magnetic field depends on the shape of the conductor and its critical current density, so we can estimate the effective critical current density from measuring the magnetization loss. In this paper, to prove the effectiveness of this indirect estimation of the critical current, we prepared several different kinds of YBCO CC (coated conductor) including a stacked conductor short samples and measured the magnetization losses and the critical currents of each sample by using linked pick up coils and direct voltage measurement with transport current respectively.

**Key Words:** magnetization loss, indirect estimation, critical current density.

#### 1. 서 론

초전도 선재를 이용한 전력기기의 개발에 있어 대전

류 통전과 교류손실 저감 기술은 반드시 필요한 중요 요소기술들이다. 대전류 통전을 위한 방법으로는 다수의 초전도 선재를 적층하여 통전 전류를 높이는 방법이 주로 사용되고 있고, 교류손실 저감을 위한 방법으로는 초전도 선재의 초전도 층을 분할하여 교류손실을 낮추는 방법들이 연구되고 있다[1]. 하지만 대전류, 저손실용으로 제작된 적층 선재들의 경우 일반적으로 선재의 특성평가를 위해 반드시 필요한 임계전류의 측정이 어려운데 이는 전류 통전을 통한 측정과정에서 소선 간 전류 불균형으로 인해 샘플이 손상될 수 있는 문제를 가지고 있기 때문에 직접적으로 임계전류밀도를 측정하기는 어렵다. 따라서 본 논문에서는 자화손실 측정결과를 이용해 초전도 선재의 임계전류밀도를 추정하는 방법을 제안하였다. YBCO CC를 이용하여 제작된 여러 종류의 적층 및 분할형 선재 샘플의 자화손실을 측정하고, 자화손실 측정결과를 이용하여 선재의 완전침투 자장을 확인하고 이를 이용하여 초전도 선재의 임계전류밀도를 추정하였다. 이렇게 추정된 임계전류밀도는 측정결과와 비교하여 논문에서 제시하는 추정방법의 신뢰성을 검토하였다.

#### 2. 본 론

##### 2.1. 자화손실의 측정방법

고온 초전도 선재의 자화손실 측정은 균일한 외부자장을 초전도 샘플에 인가하여 이때 발생하는 에너지의 유출입을 이용하여 얻을 수 있다. 1주기 당, 단위길이 당 자화손실은 식 (1)에 나타내었다.

$$Q_m = \oint_s \vec{E} \times \vec{H} \cdot d\vec{s} \quad (1)$$

여기서  $\vec{E}$  는 샘플을 따라 발생된 전계이고,  $\vec{H}$  는 외부인가자계의 세기이다. 식 (1)을 측정된 전압과 전류를 이용하여 1주기 당, 단위체적당 고온초전도 선재의 자화손실로 표현하면 식 (2)를 얻을 수 있다.

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

식 (2)의  $k$ 는 외부인가 자장을 만드는 자석의 단위 전류당 발생자속밀도를 나타내는 자석상수이고,  $C_{pm}$ 는 픽업코일의 보정상수,  $V_s$ 는 샘플의 체적이다. 그림 1에 자화손실 측정 회로도도 나타내었다. 초전도체 샘플은 픽업코일 내부에 위치하고, 외부자장이 인가되는 경우 픽업코일에 유기되는 전압은 샘플에서 발생하는 자장

<sup>1</sup>정 회 원 : 한국산업기술대학교 에너지대학원

<sup>2</sup>정 회 원 : 한전 전력연구원

<sup>3</sup>정 회 원 : 우석대학교 소방안전학과

\*교신저자 : jikwang@woosuk.ac.kr

원고접수 : 2010년 04월 26일

심사완료 : 2010년 08월 20일

게재확정 : 2010년 08월 20일

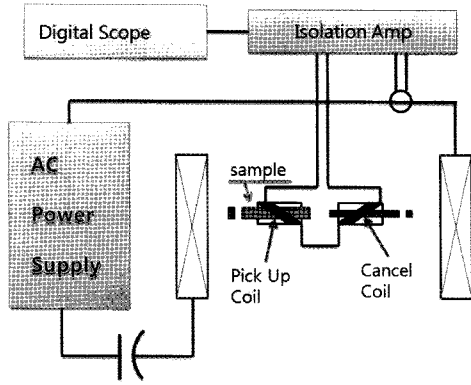


Fig. 1. Experimental circuit for magnetization loss measurement.

과 외부자장과 의 합으로 나타나므로 샘플에서 발생하는 자장 성분만을 얻기 위해 픽업코일과 동일한 턴 수의 캔슬코일을 픽업코일과 연결해 외부자장에 의한 유기기전력을 상쇄시키도록 하였다[2].

자화손실의 측정에 사용된 샘플들은 Superpower사와 AMSC사의 선재를 이용하여 제작 하였다. 샘플 선재의 자세한 사양은 표 1과 그림 2에 나타내었다.

측정에 사용된 샘플 1은 12 mm 폭의 안정화층이 없는 초전도선재이고, 샘플 2,3은 각각 12 mm 와 4 mm 폭의 구리 안정화층이 있는 초전도선재이다. 샘플 4는 4.3 mm 폭의 가진 안정화층이 있는 초전도선재로 Hastelloy를 기판으로 사용하는 다른 샘플과 달리 Ni5%W 기판이 사용되었다. 샘플 5,6,7은 각각 저손실,

Table 1. Specification of HTS Conductor.

	Sample 1	Sample 2	Sample 3	Sample 4
Type	SF12050	SCS12050	SCS4050	344C
Width [mm]	12	12	4	4.3
Thickness [mm]	0.05	0.095	0.095	0.2
Stabilizer	-	Cu, 40 $\mu$ m	Cu, 40 $\mu$ m	Cu, 100 $\mu$ m
Substrate	Hastelloy	Hastelloy	Hastelloy	Ni5%W

	Sample 5	Sample 6	Sample 7	Sample 8
Type	F1,N1,4.5	FL,N1,5.3	F2,N1,5.3	FL,N2,5.3
Width [mm]	4.5	5.3	5.3	10.6
Thickness [mm]	0.05	0.05	0.05	0.05
Stabilizer	-	-	-	-
Substrate	Hastelloy	Hastelloy	Hastelloy	Hastelloy

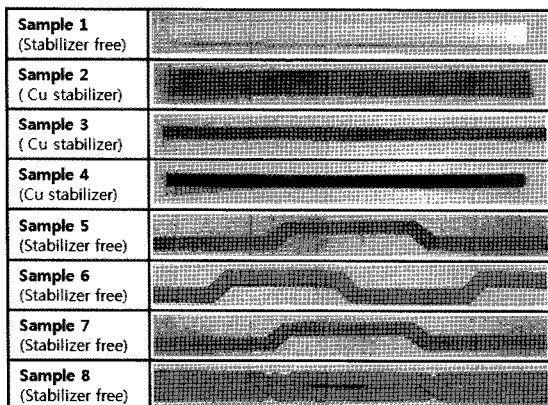


Fig. 2. Configuration of HTS Samples.

대전류용 전위형 적층 선재에 사용되는 소선으로 12 mm 폭의 안정화층이 없는 선재를 각각 4.5 mm 와 5.3 mm 폭으로 재단하여 캡톤테이프로 절연한 샘플이다. 샘플 7은 교류손실 감소를 위해 초전도층을 레이저로 2분할한 샘플이다. 샘플 8은 5.3 mm의 소선 2개를 이용하여 제작된 전위형 적층 선재이다[1]. 각각의 샘플 선재들은 그림 1에 나타난 측정방법으로 자화손실을 측정하였고 측정된 자화손실 결과를 그림 2과 그림 3에 각각 나타내었다.

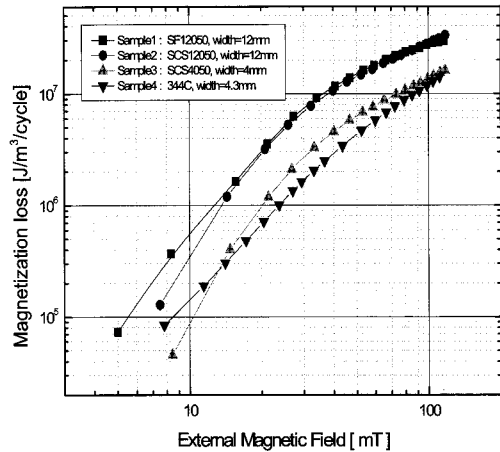


Fig. 3. Experimental result of magnetization loss measurement : sample 1, 2, 3, 4.

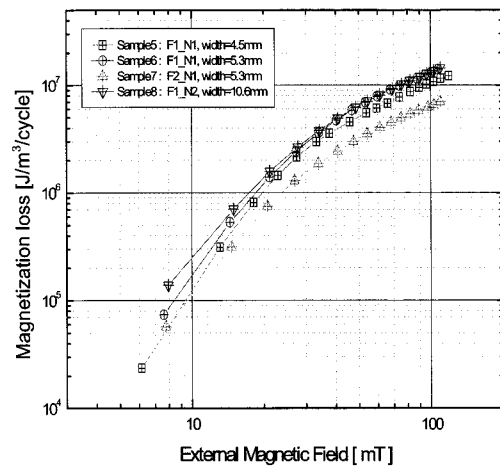


Fig. 4. Experimental result of magnetization loss measurement : sample 5, 6, 7, 8.

2.2. 임계전류밀도의 추정방법

초전도 선재의 수직방향에서 인가되는 외부자장에 의한 자화손실 계산에는 일반적으로 식 (3)에 나타낸 브란트의 스트립모델식이 사용된다[3].

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

여기서,  $B_m$ 은 외부인가 자장의 크기이고,  $d$ 는 선재의 두께,  $w$ 는 선재의 폭을 나타낸다.  $\beta$ 는 외부인가 자장과 특성자장의 비를 나타내고 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\beta = \frac{B_m}{B_d} \quad (4)$$

여기서  $B_d$ 는 특성자장의 크기이고, 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$B_d = \frac{\mu_0 J_c d}{\pi} \quad (5)$$

식 (5)를  $J_c$ 에 대해 나타내면 식 (6)과 같이 적을 수 있다. 임계전류밀도는 식 (6)을 이용하여 추정할 수 있다.

$$J_c = \frac{\pi B_d}{\mu_0 d} \quad (6)$$

자화손실 측정 결과를 이용해 샘플 선재들의 임계전류밀도를 추정하기 위해서는 특성자장  $B_d$ 를 정의해야 한다. 식 (4)의  $\beta$ 를 이용하여  $B_d$ 를 정의하기 위해서는 자화손실 측정결과에서 손실밀도 변화가 최대인 외부인가자장을 확인해야 하므로 샘플들의 자화손실 측정결과를 식 (7)과 같이 정규화 시킨다.

$$\text{Normalized loss} = \frac{Q_m}{B_m^2 / 2\mu_0} \quad (7)$$

이렇게 표현된 정규화 손실은 loss factor의 개념으로 생각할 수 있으며 자화손실 측정결과 그래프에서 손실증가 패턴이 변하는 외부자장의 크기를 쉽게 판별할 수 있게 해준다. 식 (3)의 스트립모델식을 정규화시키면 다음 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\text{Normalized loss} = \frac{2\pi w}{d\beta} \left[ \frac{2}{\beta} \ln(\cosh \beta) - \tanh \beta \right] \quad (8)$$

손실밀도의 변화가 최대가 되는 외부인가자장의 크기를 확인하기 위해 식 (8)을  $\beta$ 에 대해 미분하였다. 미분결과 손실밀도의 변화율이 0이 되는  $\beta$  값이 2.4642임을 확인하였다.

따라서 특성자장  $B_d$ 의 크기가 외부인가자속밀도  $B_m$ 의 2.4642배 일 때 자화손실밀도의 변화는 최대가

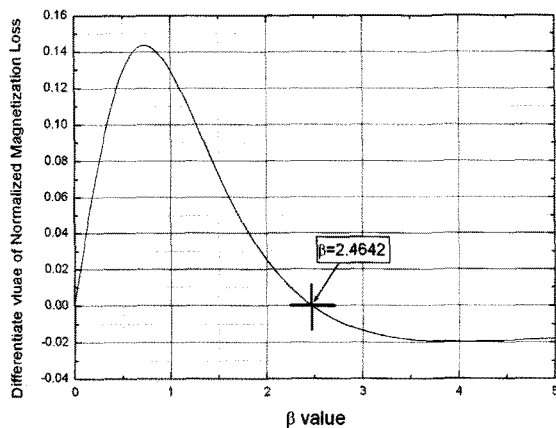


Fig. 5. Differentiate value of normalized Magnetization loss according to  $\beta$  value.

됨을 알 수 있다. 이때 외부인가자장의 크기를 알면 특성자장의 크기를 정의할 수 있다. 본 논문에서는 자화손실 측정 결과를 이용하여 특성자장을 정의하기 위해 각각의 샘플 선재들의 자화손실 측정결과를 정규화하고, 손실밀도의 변화가 최대가 되는 외부인가자장의 크기를 확인하였다. 정규화한 자화손실결과는 그림 6과 그림 7에 각각 나타내었다.

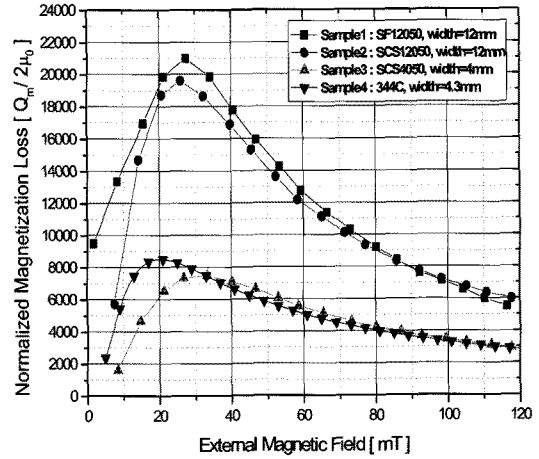


Fig. 6. Experimental result of normalized magnetization loss measurement : sample 1, 2, 3, 4.

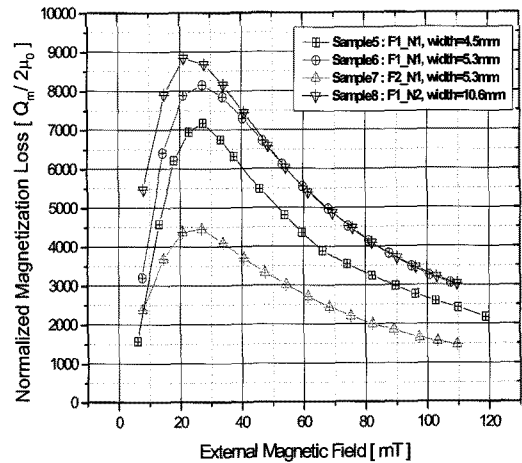


Fig. 7. Experimental result of normalized magnetization loss measurement : sample 5, 6, 7, 8.

### 2.3. 임계전류밀도 추정결과 및 측정결과와 비교

자화손실 측정결과를 이용하여 추정한 임계전류밀도에 대한 신뢰도를 검증하기 위해 각 샘플의 임계전류밀도를 측정하여 측정결과와 추정결과를 각각 비교하였다. 자화손실 측정결과는 그림 8과 그림 9에 각각 나타내었고, 임계전류밀도의 비교 결과는 표 2에 나타내었다.

측정 결과 Ni5%W substrate를 사용한 Sample 4의 경우 약 45%의 오차가 있음을 확인하였다. 그 이유는 Ni5%W substrate를 사용한 선재의 경우 substrate가 자성체이므로, 자화손실 측정 결과에 영향을 미치기 때문으로 보인다. 반면 Hastelloy 계열의 substrate를 사용한 선재의 경우에는 추정방법에 의한 임계전류밀도가 측정된 실제 임계전류밀도와 약 6% 이내의 오차로 일치하는 것을 확인하였다.

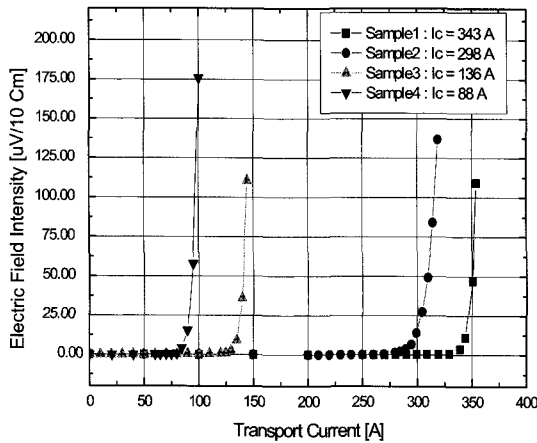


Fig. 8. Experimental result of critical current measurement : sample 1, 2, 3, 4.

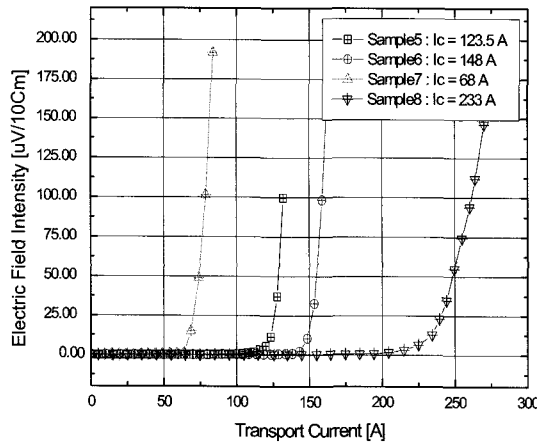


Fig. 9. Experimental result of critical current measurement : sample 5, 6, 7, 8.

Table 2. Comparison of result of measurement and estimation.

	Estimation of critical current density	Measurement of critical current density	error
Sample 1	27.7 A/m <sup>2</sup>	28.6 A/m <sup>2</sup>	3.2 %
Sample 2	27.3 A/m <sup>2</sup>	26.8 A/m <sup>2</sup>	1.9 %
Sample 3	27.7 A/m <sup>2</sup>	27.9 A/m <sup>2</sup>	0.7 %
Sample 4	29.8 A/m <sup>2</sup>	20.5 A/m <sup>2</sup>	45 %
Sample 5	21.5 A/m <sup>2</sup>	22.0 A/m <sup>2</sup>	2.3 %
Sample 6	26.3 A/m <sup>2</sup>	24.8 A/m <sup>2</sup>	6 %
Sample 7	33.8 A/m <sup>2</sup>	34.0 A/m <sup>2</sup>	0.6 %
Sample 8	27.3 A/m <sup>2</sup>	25.7 A/m <sup>2</sup>	5.8 %

### 3. 결 론

본 논문에서는 YBCO CC를 이용해 제작된 여러 형태의 적층 및 분할형 선재 샘플의 자화손실을 측정하고 측정된 결과를 이용해 초전도 선재의 특성자장을 구한 후 이를 이용하여 초전도 선재의 임계전류밀도를

추정하는 방법을 제안하였다. 이렇게 추정된 임계전류 밀도를 임계전류 측정결과와 비교 하였다. 비교 결과 자화손실을 통해 추정하는 방법은 Hastelloy 계열의 substrate를 사용한 선재의 경우에는 기존의 임계전류 측정결과와 6 % 이내의 오차율로 일치하는 것을 확인 하였다. 픽업코일을 이용한 자화손실의 측정은 선재에 전류를 인가하지 않고 측정되기 때문에 임계전류 밀도 측정을 위한 전류 통전 시 발생될 수 있는 적층선재의 전류분배 문제나 선재의 임계전류 불균형에 의한 국부적인 발열 및 선재의 손상이 없이 초전도 선재의 임계전류 밀도를 확인할 수 있다는 장점을 가지고 있으므로 추후 다양한 형태의 고온초전도 선재들 및 적층형 선재들의 임계전류 밀도의 확인에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

### 감사의 글

본 연구는 지식경제부의 지원에 의하여 기초전력 연구원 (2008T100100139) 주관으로 수행된 과제 임.

### 참 고 문 헌

- [1] Ji-Kwang Lee, "Reduction Effect on Magnetization Loss in the Stacked Conductor With Striated and Transposed YBCC Coated Conductor", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 19, issue 3, pp. 3340-3343, 2009.
- [2] Z Jiang, "An experimental method for total AC loss measurement of high Tc superconductors", Superconductor Science and Technology, 17, pp. 371-379, 2004.
- [3] EH Brandt, "Type-II-superconductor strip with current in a perpendicular magnetic field", Physical review B, vol.48, Issue 17, 1993.

### 저 자 소 개



이세연 (李世淵)

1979년 2월 25일생, 2008년 성균관대학교 전기공학과 졸업(공학석사), 현재 한국산업기술대학교 위촉연구원.



박상호 (朴相浩)

1969년 2월 10일생, 1996년 한국해양대학교 전기공학과 졸업, 2004년 동대학원 공학박사, 현재 한국산업기술대학교 겸임교수.



김우석(金佑錫)  
1970년 6월 12일생, 1996년 서울대학교 전기공학과 졸업, 2002년 동 대학원 공학박사, 현재 한전전력연구원 연구원.



최경달(崔景達)  
1962년 2월 12일생, 1984년 서울대 전기공학과 졸업, 1993년 동대학원 전기공학과 (공학박사), 현재 한국산업기술대학교 에너지대학원 교수.



이지광(李志光)  
1966년 6월 1일생, 1989년 서울대 전기공학과 졸업, 1997년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사), 현재 우석대학교 소방안전학과 교수.