

기계적으로 분할된 YBCO 선재의 교류손실 감소에 대한 연구

A study on the reduction of ac loss of YBCO coated conductor by a mechanical striation method

유용수¹, 홍계원², 이희균^{2,*}

Yong-Su Yoo¹, Gye-Won Hong², Hee-Gyoun Lee^{2,*}

Abstract: High temperature superconductor (HTS) coated conductors has high hysteretic magnetization loss which is an obstacle for the AC applications of coated conductors.

We propose a method to reduce the magnetization loss of the coated conductor. It is the mechanical striation method by load variety using office knife. The magnetization loss measured in the mechanical striated YBCO coated conductor without copper layer was compared with the loss generated by perpendicularly exposed external magnetic filed.

The reduction in magnetization loss due to the mechanical striation is clearly shown at higher field and was dependent on the striation number. The mechanical striation method was proven to have additional advantages of a low cost and high fabrication process.

Key Words: YBCO coated conductor, mechanical striation, magnetization loss.

1. 서 론

전력기기에 사용되는 선재의 통전 재료는 일반적으로 구리가 사용되고 있다. 구리선의 경우 저항을 가지고 있으며, 이 저항에 의해 전류의 제곱에 비례하는 저항손실이 발생한다. 특히 대용량 전력기기의 경우 높은 전력을 사용하므로 저항 손실에 의한 효율감소를 줄이기 위해 굵기가 큰 구리선을 사용해야 하는 단점을 가지고 있다.

초전도체는 임계전류, 임계자장과 임계온도 이하에서 물질의 전기 저항이 0 이기 때문에 저항손실이 발생하지 않아 효율을 높일 수 있다. 그러나 저항이 없는 초전도체에 있어서도 교류 전류가 흐르게 되면 손실이 발생한다. 손실 발생의 근본적인 원인은 자장의 변화에 있으며, 이와 같이 전류나 자장의 변화에 의해 발생하는 손실을 교류 손실이라고 부른다.

초전도를 이용하는 목적은 보통 소형 경량화와 손실 감소에 따른 기기 효율의 향상에 있으며, 교류손실이

크다면 손실 감소라는 목적을 달성할 수 없게 된다.

여기서 중요한 사실은 교류손실은 그 자체의 크기만으로 효율을 계산해서는 안 된다는 것이다. 즉 초전도 기기는 사용되는 초전도체의 임계온도이하의 극저온에서 동작하는데, 극저온에서 손실에 의한 발열이 생긴 경우 그 열을 제거 해주기 위해서 냉각장치는 훨씬 더 큰 에너지를 소비해야 한다. 액체 질소의 경우에는 수십 배, 액체 헬륨의 경우 수백 배의 에너지를 냉각 장치가 소모하게 된다. 이로 인해, 초전도를 교류에서 동작하는 전력기기에 응용하고자 할 경우 교류손실은 가장 큰 장애의 하나가 된다.

최근 각광을 받고 있는 2세대 고온초전도체 선재의 경우 높은 임계전류, 높은 임계자장, 높은 임계온도로 인해 케이블, 발전기, 변압기, 환류기 등의 초전도 전력기기 뿐만 아니라, 고자장 MRI, 단결정 성장기, 자기분리기 등 강한 자기장을 필요로 하는 다양한 응용분야에 폭넓게 사용될 것으로 기대되고 있다. 2세대 고온초전도체 선재의 경우 폭이 넓고 두께가 얇은 금속 기판 위에 세라믹 완충층 및 고온초전도 박막 그리고 금속 보호층으로 이루어져 있다. 현재 2 세대 고온초전도체 선재의 표준으로 4 mm 폭의 선재가 사용되고 있으며 두께는 대략 150 μm 이하로 제조되고 있다.

초전도체의 교류손실은 자화손실(magnetization loss), 와류손실(eddy current loss)와 결합손실(coupling loss)로 구성되어 있다. 2세대 고온초전도 선재를 교류 전력기기에 사용하는데 있어 교류 손실은 커다란 장애가 되고 있다[1,2]. 2세대 고온초전도체 선재의 경우 선재 두께에 비해 폭이 넓은 기하학적 요인으로 인해 선재 면에 수직한 자장에 의한 자화손실이 주를 이루고 있으며[3-6] 또한 다심선재 제조 및 twisting을 극히 어렵게 한다. 초전도체 선재의 교류손실을 절감하기 위한 방법으로는 다심선재 제조, twisting, 전위(transposition) 등 여러 가지 방법이 제안되어 있다. 자화 손실은 선재의 폭을 좁혀주어 종횡비를 줄여줌으로써 해서 대폭적으로 감소시킬 수 있으며 그 방법으로는 laser 식각, 사진식각(photolithography), 외과수술용 칼을 사용하는 방법이 제시되어 있다[7-9]. 그러나 laser 식각과 사진식각(photolithography)은 생산성이 낮고 대량생산을 위한 장비의 복잡성 및 낮은 경제성으로 인해 길이가 긴 장선재 제조 및 실제 생산 현장에서 사용되기 어려운 것으로 판단된다.

외과수술용 knife를 사용하여 보호층 및 고온초전도 박막 층을 제거하는 방법은 비교적 간단하고 값비싼 장비가 필요하지 않으며 장선재를 대량으로 처리하기에 매우 좋은 방법으로 사료되나 아직까지 체계적인 연구가 진행되지 않고 있다.

본 연구는 2세대 고온 초전도체인 YBCO coated conductor에 knife를 이용하여 기계적인 힘을 가해 보

¹학생회원 : 한국산업기술대학교 에너지대학원 석사과정

²정 회 원 : 한국산업기술대학교 에너지대학원 교수

*교신저자 : hglee@kpu.ac.kr

원고접수 : 2009년 02월 02일

심사완료 : 2009년 03월 02일

게재확정 : 2009년 03월 02일

호층 및 고온초전도 박막을 분할시 knife에 가하는 힘에 따른 고온초전도 선재의 분할 특성, 임계전류 특성과 자화손실 특성을 측정하였다.

2. 실험방법

2.1. 측정 샘플

본 연구에서는 Superpower社에서 제작된 YBCO CC를 사용하였으며 선재의 사양은 표 1에 나타내었다.

Table 1. Specification of YBCO CC.

HTS wire	YBCO Coated conductor
Width	12 mm
Thickness of YBCO layer	1 μm
Substrate (thickness)	Hastelloy (50 μm)
Over layer (thickness)	Ag (2 μm)
Substrate Resistance	125 Ω
Critical current	290 A/cm at 77.3K, self field

2.2. 분할 장치

초전도 선재에 기계적인 힘으로 가하여 선재의 초전도층을 폭이 좁은 소선으로 분할하는 방법을 그림 1에 도식 하였다. knife 끝에 하중이 가해진 상태에서 knife를 손으로 이동시켜 초전도 선재가 소선으로 분할되도록 하였으며 이 때 칼날의 이동속도는 일정하게 유지하도록 노력하였다. knife는 일반적으로 사용하는 사무용 칼을 사용하였고, knife의 길이는 8 cm이고 폭은 1.1 cm이다. 초전도 선재와 knife가 이루는 각도는 45°로 고정하였고, 저용량 무게 추를 사용하여 하중을 50~1000 gram의 범위에서 변화시켰다.

1회 분할시 마다 knife를 교체하여 있을지 모르는 knife의 마모로 인한 영향을 최소화하였다.

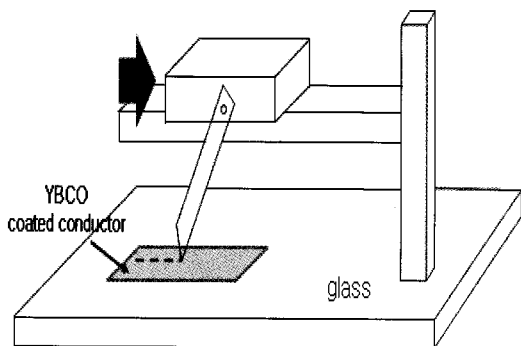


Fig. 1. Schematic diagram of a mechanical striation method.

2.3. 자화 손실 측정용 샘플 제작

분할된 소선 수에 따른 자화손실 변화를 측정하기 위해 고온 초전도체 선재를 800 gram의 하중을 가하면서 일정한 속도로 이동시켜 고온 초전도체 선재를 그림 2에 나타낸 바와 같이 각각 1분할, 3분할, 5분할 하였다.

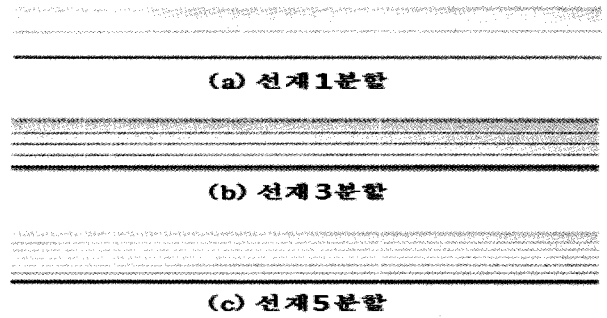


Fig. 2. Stabilizer free YBCO CC samples with (a) 1, (b) 3, and (c) 5 striations.

2.4. 임계전류 특성 측정

선재 분할 시 가한 하중 값에 따른 임계전류 변화특성을 관찰하기 위해서 5 cm 길이의 선재 중앙을 1회 분할한 후 분할선을 가로 질러 전류를 흘리며 선재의 전류-전압 특성을 4단자법으로 측정하였다(그림 3). 고온초전도 선재의 임계전류 값의 기준은 1 $\mu\text{V}/\text{cm}$ 의 기준을 적용하였다.

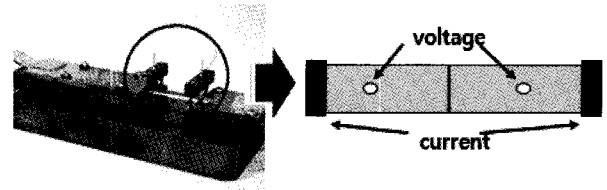


Fig. 3. Measurement of critical current for four probe resistive method.

2.5. 자화손실 특성 장치

자화 손실은 Jiang과 Amemiya에 의해 제안된 linked pickup coil(LPC) 방법[10]을 사용하여 측정하였으며 자화손실 측정 회로도를 그림 4에 나타내었다. 외부에서 교류자장을 가해주고 초전도체의 자화량을 측정하는 방법이다. 외부에서 자장을 인가해 주어야 하므로 대형 장치에는 적용하기 어렵고 짧은 길이의 초전도체 샘플의 자화손실 측정에 주로 사용되는 방법이다. 솔레노이드 내부에는 모양과 크기가 동일한 두 코일이(pick-up coil과 cancel coil) 배치되어 있는데 그 중 pick-up coil에 초전도체 샘플을 위치시킨다.

외부 자장이 인가되는 경우에 픽업코일에 유기되는 전압은 초전도선재 샘플에서 발생하는 자장과 외부자장의 합성에 의해 나타나므로 초전도선재의 샘플에서 발생하는 자장만을 얻기 위해 pick-up coil과 동일한 턴 수의 cancel coil을 연결하고, 이때 코일방향을 서로 다른 방향으로 하여 외부 자장에 의해 발생하는 유기 기전력을 상쇄시킨다. 본 실험에 사용된 코일의 두께는 30 μm 이고, 코일의 턴 수는 850 턴이다. 이때 코일의 면적은 30 mm \times 30 mm \times 30 mm 이다.

고온 초전도선재의 자화손실은 균일한 외부 자장을 고온 초전도선재의 샘플에 인가하고, 그때 발생하는 에너지의 유출입으로부터 얻을 수 있으므로 LPC로부터 만들어지는 공간(box)내의 초전도 시료로부터 1 cycle 당, 단위 부피 당 소실되는 전력손실, Q는 다음과 같이 표현된 Poynting 벡터에 의해 얻어질 수 있다.

여기서 \vec{E} 는 LPC를 따라 유도된 전기이고 \vec{H} 는 외부

$$Q = -\frac{1}{V_s} \int_0^T \oint_S (\vec{E} \times \vec{H}) \cdot d\vec{S} dt \quad (1)$$

자석(background magnet)에 의해 인가된 외부 자장(external magnetic field)이다. V_s , S , T 는 각각 LPC로부터 만들어지는 공간(box)내의 시료의 체적, box의 표면과 한 cycle당 주기이다. Anti-series로 연결된 LPC와 cancel coil로부터 전압(유도전계)과 자석의 인입선으로부터 측정되는 전류(외부인가자장)를 검출하면 자화손실을 측정할 수 있다.

앞의 식(1)을 전압, $V(t)$ 와 전류, $I(t)$ 로 다시 표현하면 다음과 같다.

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

여기서 Q_m 은 cycle당 단위체적당 자화손실이며, k 는 자장인가용 코일 자석의 단위 전류당 발생 자속 밀도를 나타내는 자석상수로 본 실험에서는 4.8 mT/A이다. C_{pu} 는 픽업코일의 보정상수, V_s 는 샘플의 체적이다.

폭 12 mm이고 길이 150 mm인 시료의 중앙부가 LPC의 중앙부에 위치하도록 놓고 측정하였으며 LPC에 의해 형성되는 공간(box)는 60 mm이다. 측정하고자 하는 샘플은 지지대에 잘 부착하여 측정 중 움직이지 않도록 고정시켰다.

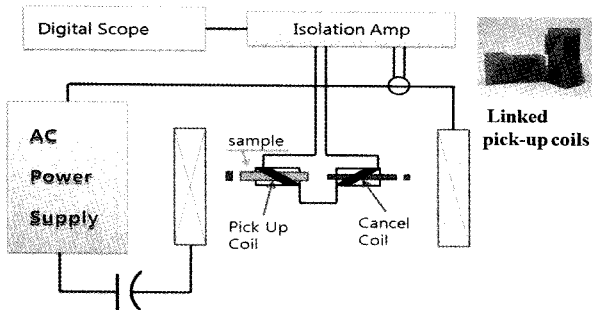


Fig. 4. Experimental circuit for magnetization loss measurement.

3. 결과 및 토론

3.1. 하중에 따른 임계전류의 변화

기계적인 방법으로 YBCO coated conductor를 분할 시 knife에 가해진 하중에 따른 임계전류 변화를 측정하여 그림 5에 나타내었다. 측정 시료는 그림 3과 같은 방법으로 knife에 걸리는 하중을 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1000 gram으로 변화하여 5 cm 길이의 선재 중앙을 각각 1회 분할한 후 분할선을 가로 흐르는 임계전류를 측정하였다. 임계전류는 하중이 증가함에 따라 거의 직선적으로 감소하며 800 gram에 이르면 임계전류가 거의 0이 되는 것을 관찰할 수 있다. 이것은 분할하중이 증가함에 따라 초전도층에 변형이 생기고 전류가 흐를 수 있는 단면적이 감소하여 임계전류가 감소하고 궁극적으로 초전도 전류가 흐를 수 있는 통로가 완전하게 파괴되어 임계전류가 0에 이르는 것으로 생각된다.

Kawashima 등[11]은 1.35 mm 두께의 YBCO박막에서 균열이 전파되는 인장임계응력을 320 MPa 이라고 보고하였다. 그림 6은 knife 끝에 800 gram의 하중이 걸렸을 때 변형된 초전도 선재 표면의 사진이다. 그림 6에서 관찰한 knife가 초전도체 선재 분할 시 선재와 접촉하는 면적을 $100(\text{폭}) \times 78(\text{길이}) \text{mm}^2$ 이라 가정하면 임계전류가 0에 가까워지는 하중 값 800 gram으로부

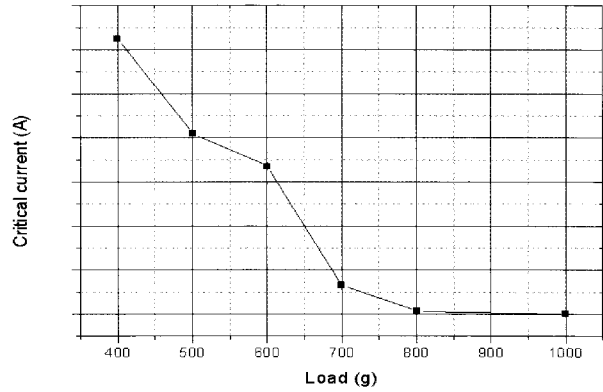


Fig. 5. Variations of the critical current by a change of load.

터 계산한 임계 stress는 대략 $0.8 \times 10^8 / 6213 \text{ kgf/cm}^2 = 0.098066 \times 1.287 \times 10^{-4} \times 10^8 \text{ Pa} = 784 \text{ MPa}$ 이다.

Kawashima[11]등이 보고한 값은 인장임계응력이고 본 실험에서는 표면에 은 층이 존재할 뿐 아니라 knife에 압축력이 가해지므로 Kawashima[11]등이 보고한 320 MPa값과 서로 비교할 수 없는 값이다.

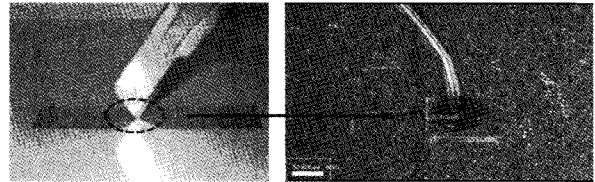


Fig. 6. Contact surface of office knife and YBCO coated conductor.

3.2. 분할된 선재의 단면 미세조직

그림 7은 분할하중 변화에 의한 분할선재 단면의 미세조직 변화이다. 선재의 분할된 부분을 Focused Ion Beam(FIB)로 가공한 후 주사전자현미경으로 관찰하였다. 800 gram의 하중에서도 아직 초전도박막 층은 완전히 제거되지 않았으며 부분적으로 초전도 박막이 초기 두께를 유지하고 남아있는 것이 관찰되었다. 이는 칼 날이 박막 표면에 완전히 수직을 유지하지 못하고 기울어져 박막의 변형이 부분적으로 불균일하였기 때문으로 생각된다. 그러나 1000 gram이 되었을 때는 초전도층이 완전히 제거된 것을 알 수 있다. 따라서 칼날을 사용하여 초전도 선재에 변형을 가하는 경우 일정 압력 이하인 경우에는 초전도 박막은 제거되지 않고 그 두께를 유지하며 기계적인 변형을 받는다고 할 수 있다. 이 때 가해진 압력이 초전도체의 항복강도를 넘어서면 초전도박막에 균열이 발생할 것이다. 따라서 균열이 초전도박막 두께 이상의 크기로 형성되면 균열로 인해 초전도 전류가 흐르지 못하고 초전도 박막의 임계전류는 0이 되고 초전도 박막은 전기적으로 완전하게 분할된다고 생각할 수 있다. 1000 gram인 경우 선재가 완전히 제거되었지만 완충층이 파괴되었을 가능성이 있어서 800 gram 시료에서 Ac loss 측정 하였다.

앞서 초전도선재를 분할 하중에 따라 임계전류 값이 직선적으로 감소하였으며 하중이 800 gram이 되어도 임계전류가 완전히 0으로 되지 않는 것이 관찰되었다. 단면 관찰 결과 하중이 400 gram인 경우에는 초전도 박막의 두께에는 거의 변화가 없는 것이 관찰되었다. 따라서 초전도 박막에 형성되는 균열의 깊이는 가해진 압력에 비례해 직선적으로 증가한다고 하는 가정은 타당한 것으로 생각된다.

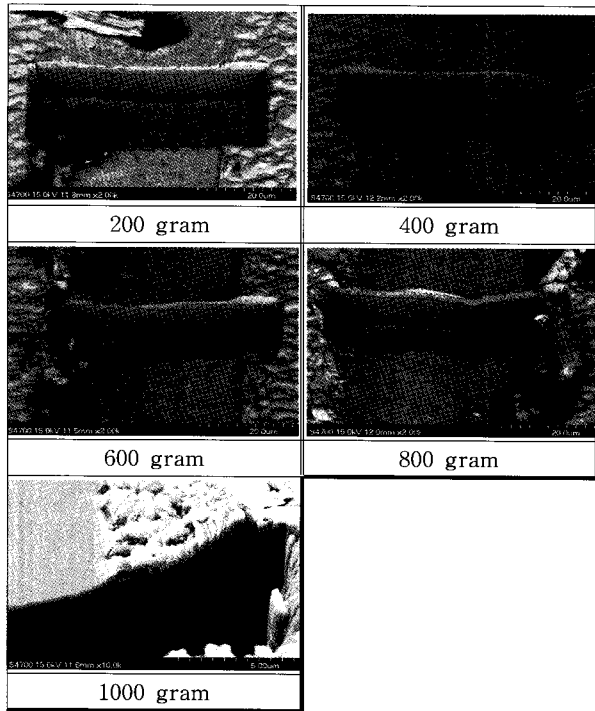


Fig. 7. SEM image of a striated YBCO coated conductor at different load.

4.3. 분할된 면적의 임계전류 특성 측정(1)

그림 8은 분할된 각 소선의 임계전류 측정 방법에 대한 개략도이다. 측정하고자 하는 소선과 이웃하는 소선을 절연테이프를 이용하여 전기적으로 절연시켜 각 소선의 임계 전류를 측정하였다. 선재의 분할하중 값은 800 gram으로 수행하였다.

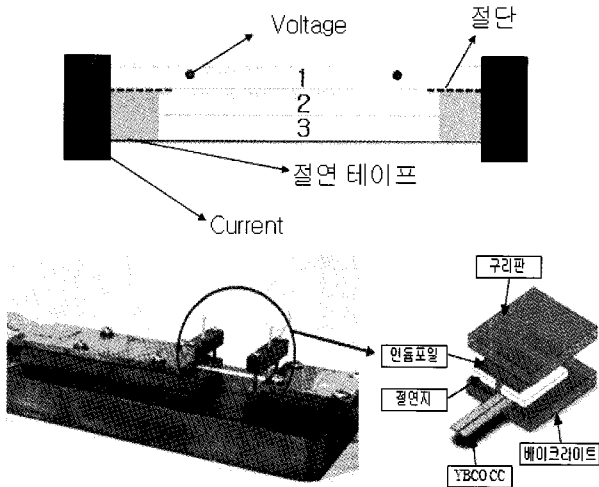


Fig. 8. Experimental setup for measurement of critical current.

그림 9는 고온 초전도체 선재를 3분할한 임계 전류 특성값이다. 실제 임계전류 측정값은 82 A, 83 A, 105 A, 총 270 A를 나타내었다. superpower 社의 YBCO coated conductor의 임계전류값이 오차범위가 30 A이기 때문에 분할한 면적에 임계전류가 고르게 분포 된 것을 확인 할 수 있었다. 이것은 초전도 선재의 소선

사이가 전기적으로 분할되어 초전도 전류가 분할된 경계를 통해서는 흐르지 않는다는 것을 말해주고 있다. 800 gram인 경우 임계전류(1.8 A)가 측정되기 때문에 (그림 5) 소선 사이에 작은 전류가 흐를 것으로 예상했지만 각 소선의 임계전류에 비해 작기 때문에 각 소선의 임계전류를 측정시 영향을 받지 않는 것으로 판단된다. 앞서 측정된 결과와 분할된 각각의 선재의 임계전류 측정결과로부터 800 gram의 하중으로 knife를 이용하여 분할한 선재는 전기적으로 완전한 소선을 이룬다고 할 수 있다.

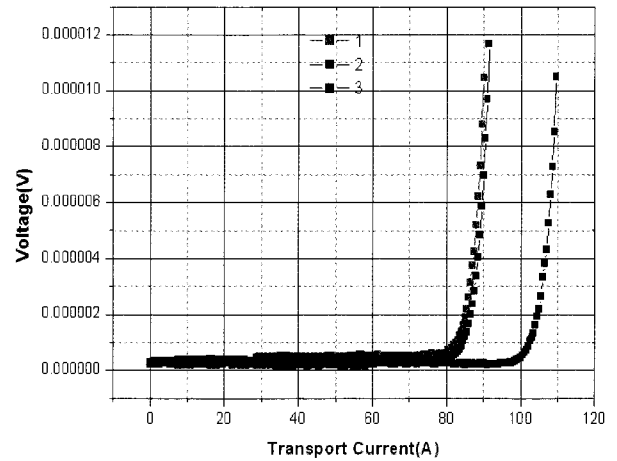


Fig. 9. Critical current of a separate striation at 3-striated YBCO coated conductor.

3.4. 자화손실 특성 측정

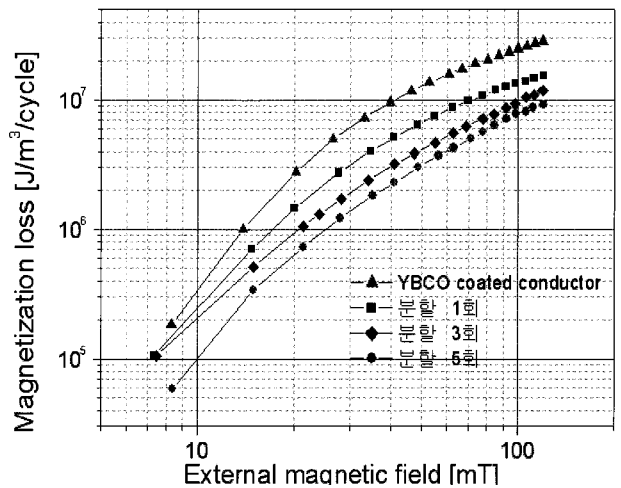


Fig. 10. Measured magnetization losses of no, 1, 3, 5-striated single YBCO coated conductor.

수직으로 인가된 교류자장에서 자화손실 측정을 위해 다른 형상을 가지는 샘플을 준비하였다. 그림 10은 고온 초전도체 선재를 1회, 3회, 5회 분할한 선재 총 3개의 선재에 대한 자화손실 특성을 측정한 것이다.

분할하지 않은 선재의 자화손실값과 비교하여 분할된 소선의 수가 증가 할수록 자화손실이 감소 되는 것을 확인 할 수 있다. 고온 초전도체의 filament tapes(N) 변화에 의한 자화손실 감소(1/N) 이론은 Irie-Yamafuji model[13]을 통해 알 수 있다. 따라서 측정된 자화 손실값과 비교하여 표2에 나타내었다.

Table 2. Measured magnetization losses of a striated YBCO coated conductor.

분할회수	예상 자화손실값 (J/m ³ /cycle)	실제 자화손실값 (J/m ³ /cycle)	%
YBCO 선재	2.86515 E7	2.86515 E7	100
1회	1.43257 E7	1.34115 E7	46
3회	7.16287 E6	1.17702 E7	41
5회	4.77525 E6	9.15324 E6	31

분할 횟수 1회인 선재의 자화손실값은 분할을 하지 않는 고온 초전도체 선재의 자화손실값과 비교하여 자화손실 감소 이론(1/N)과 같은 자화손실값이 1/2로 감소되었지만, 3회, 5회 분할한 선재는 분할회수에 비례하여 감소하지 않았다. 3회 분할된 선재는 면적이 4배이기 때문에 이론적으로 자화손실값이 YBCO coated conductor보다 1/4로 줄어들어야 한다. 그러나 실제 자화손실값은 1/2.5만 감소된 것을 확인 할수 있다. 이것은 800 gram의 하중으로 분할한 경우 미세한 임계전류(1.8 A)가 측정되기 때문에(그림 7) 소선 사이에 작은 전류가 측정 되었지만, 각각의 선재의 임계전류 측정 결과에(82 A, 83 A, 105 A) 비해 작기 때문에 각 소선의 임계전류를 측정시 영향을 받지 않는 것으로 판단 되어 전기적으로 완전한 소선을 이룬다고 가정하였다.

그러나 3개의 분할된 소선 들 간에 물리적으로 완전히 분할되지 않고 완전히 제거되지 않은 초전도 박막 혹은 은 보호층을 통해 전기적으로 연결되어 있기 때문에 3회, 5회 분할된 선재의 자화손실값은 자화손실 감소(1/N) 이론을 만족하지 않는 것으로 사료되었다.

3.5. 분할된 소선간의 임계전류 측정(2)

기계적으로 분할된 초전도 박막 소선간의 임계전류를 측정하기 위해 800 gram 으로 초전도 선재를 3분할하여 각각 소선간의 임계 전류 값을 측정 하였다. 앞서 각 소선의 임계전류 측정과는 달리 그림 11에 나타낸 바와 같이 이웃하는 소선 간의 임계전류를 측정하였다. 분할선을 세로 질러 전류를 흘리며 소선간의 전류-전압을 4단자법으로 측정하였다.

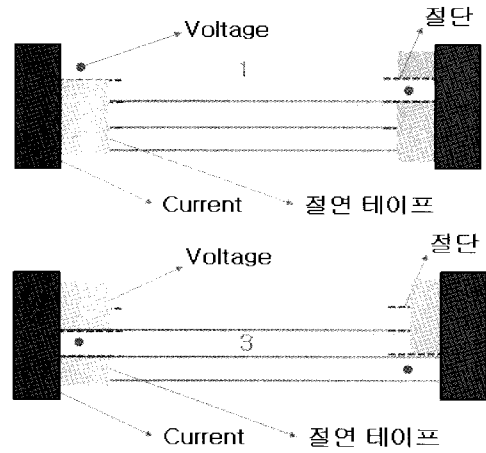
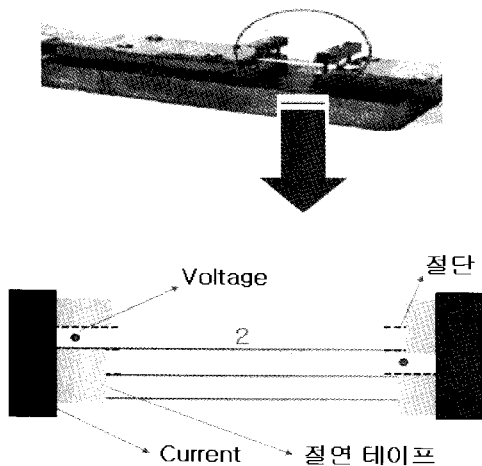
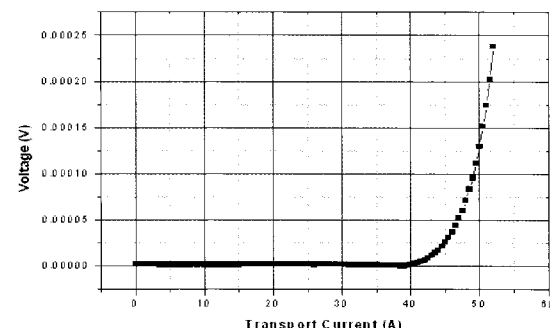
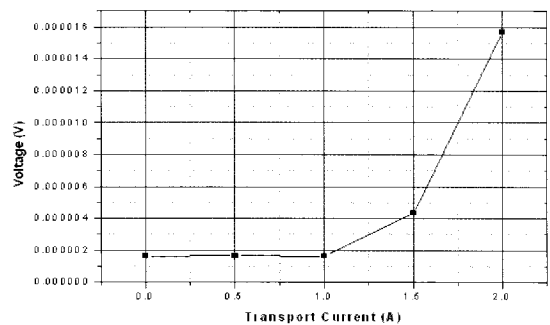


Fig. 11. Experimental setup for measurement of critical current between separate striation.

그림 12는 분할된 소선간의 임계전류를 측정 한 결과이다. 짧은 선재에서 800 gram의 분할 하중으로 선재를 분할하였을 때 임계전류가 0 으로 측정되었으나 12 cm의 상대적으로 길이가 긴 시료에서는 분할된 소선 사이가 완전한 분할이 이루어지지 않았으며 초전도 전류가 흐르고 있음을 알 수 있다. 앞서 그림 8의 방법으로 소선의 임계전류를 측정하는 것은 적합하지 않은 방법을 보여주고 있다.

Lee 등[14]은 사진식각법으로 은 보호층 및 초전도 박막층을 함께 etching하여 초전도 선재를 분할한 시료의 자화손실을 측정하였을 때 분할된 소선간에 상전도적으로 연결된 경우에는 AC loss가 감소되지 않는다고 보고하였다. 그러나 본 실험에서 기계적 방법으로 분할한 경우 표면의 은을 통해 분할된 소선들 간에 연결되어 있어도 AC loss가 감소하는 결과를 보이고 있다. 따라서 그림 12에서 보는 바와 같이 초전도적으로 연결이 되어 있어도 소선간의 임계전류가 작으면 자화손실이 감소하는 것을 알 수 있다.



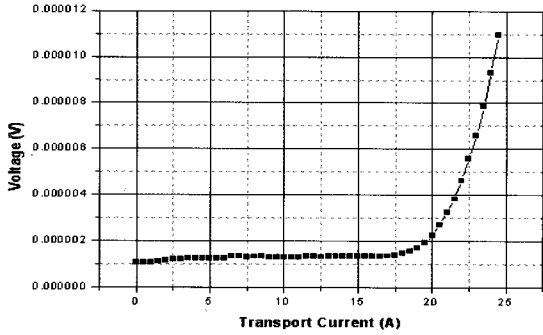


Fig. 12. Critical current of 3-striated YBCO coated conductor between the striation (a) between 1 and 2 (b) between 2 and 3 (c) between 3 and 4.

3.6. 분할된 선재의 분할부에서의 저항 측정

분할된 초전도 박막 소선이 전기적으로 연결되어 있는 것을 보다 정확하게 알아보기 위해 5 cm 선재의 중앙에 knife로 분할한 후 분할선 기준으로 좌우 0.2 mm 폭의 Ag 보호층을 에칭 시켰다. Ag 보호층을 etching 시킨 이유는 소선 사이에 미세하게 남아 있는 Ag를 제거하여 물리적으로 연결된 소선 사이를 전기적으로 절연시키기 위해서이다. 또한 0.2 mm 폭으로 선재의 위, 아래, 좌, 우를 Ag 보호층, 초전도 박막층, 안정화층을 모두 에칭하였다.(그림 13) 이는 저항 측정 시 시편의 양끝 모서리 부분으로 전류가 통하는 것을 차단하기 위해서이다.

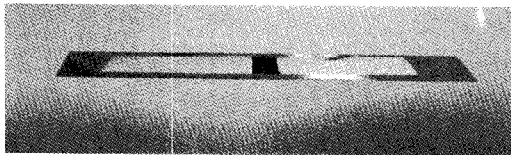


Fig. 13. Etched YBCO coated conductor after 1-striation along a vertical line.

분할선의 저항 측정은 대기압에서 Multimeter와, 액체질소 77 K에서 전압-전류 4단자법으로 각각 측정하였다(그림 14).

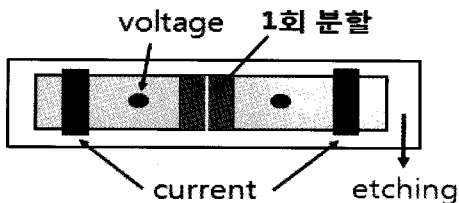


Fig. 14. Experimental setup for measurement of surface resistance.

상온에서 Multimeter로 측정한 저항 값은 일반 도체의 저항특성인 29 Ω, 액체 질소 77 K에서는 저항 값이 측정 되지 않았다. 따라서 800 gram으로 분할한 짧은 선재에서는 소선 사이에서는 상전도적으로 연결되어 있으나 초전도적으로는 단락되어 있음을 알 수 있다.

기계적으로 분할한 비교적 긴 12 cm 길이의 선재에

서는 상전도적 뿐만 아니라 초전도적으로도 연결되어 있는 것을 분할된 소선 사이의 임계전류 측정을 통해 알 수 있었다. 그러나 소선 간의 임계전류 값은 크게 감소한 것을 알 수 있다. 선재의 길이가 12 cm임을 감안하면 임계전류밀도의 감소는 매우 큰 것을 또한 알 수 있다. 따라서 기계적으로 분할한 고온초전도 선재에서 소선 간에 연결되어 있어도 Ac loss가 감소한다는 사실은 매우 흥미로운 결과이다. Lee 등[14]은 분할된 선재의 양 끝단을 soldering 하여 paste로 접합시킨 후 Ac loss를 측정하였을 때에는 소선 분할에 의한 Ac loss 감소효과가 없어진다고 보고한 바 있다

4. 결 론

기계적 방법에 의한 고온초전도선재 분할시 분할하중에 따른 선재 분할 특성에 대해 연구하였다. 800 gram의 분할하중을 칼날에 가해 선재를 분할한 후 교류손실을 측정하고 분할된 소선 수가 증가함에 따라 자화손실이 감소하는 것을 알 수 있었으며 이 때 Irie -Yamafuji model을 만족하지는 않았다. 이는 분할된 소선 간에 전기적 절연이 완전하지 않았기 때문이다. 고온초전도선재의 교류손실이 감소하기 위해서 분할된 소선 사이가 초전도적으로 완전히 분할되지 않아도 교류손실이 감소한다는 것은 매우 흥미롭다. 경계성 및 생산성이 우수한 knife에 하중을 가해 선재를 분할하는 기계적 방법이 고온초전도 선재의 교류손실 감소에 활용될 수 있는 가능성을 보여준 것으로 판단된다.

따라서 본 연구를 바탕으로 좀 더 다양한 샘플과 측정을 통해 고온 초전도체 선재의 자화손실에 관한 연구를 진행 할 예정이다.

감사의 글

교류손실 측정에 도움을 준 변상범과 결과해석에 도움을 주신 김우석 박사님께 감사드립니다. 본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 차세대초전도응용기술개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

[1] M. Iwakuma, K. Funaki, K. Kajikawa, H. Tanaka, T. Bohno, A. Tomioka, H. Yamada, S. Nose, M. Konno, Y. Yagi, H. Maruyama, T. Ogata, S. Yoshida, K. Ohashi, K. Tsutsumi, K. Honda, "AC loss properties of YBCO superconducting tapes fabricated by IBAD - PLD technique" IEEE Appl. Supercond. 11, pp. 1482, 2001.

[2] Z. Jiang, N. Amemiya, K. Kakimoto, Y. Iijima, T. Saitoh, K. Suzuki, Y. Shiohara, "The dependence of AC loss characteristics on the space in stacked YBCO conductors" IEEE Appl. Supercond. 17, pp. 2442, 2007.

[3] Cobb C B, Barnes P N, Haugan T J, Tolliver J, Oberly C E, Sumption M D, Lee E and

- Collings E W, "Hysteretic loss vs. filament width in thin YBCO films near the penetration field" IEEE Trans. Appl. Supercond. 13, pp. 3553, 2003.
- [4] Hazelton D W, Xie Y Y, Qiao Y, Zhang E and Selvamanickam V, "SuperPower's Second Generation HTS Conductor Design for Stability and Low AC Losses", Adv. Cryo. Engr. (U. Balachandra (Ed.)) 52, pp. 859, 2006.
- [5] Ashworth S P and Grilli F, "A strategy for the reduction of ac losses in YBCO coated conductors", Supercond. Sci. Technol. 19, pp. 227, 2006.
- [6] Z. Jiang, N. Amemiya, "AC loss reduction of YBCO coated conductors by multifilamentary structure" Supercond. Sci. Technol. 17, pp. 371, 2004.
- [7] J. Kawashima, Y. Yamada, I. Hirabayashi, "Critical thickness and effective thermal expansion coefficient of YBCO crystalline film", Physica C 306, pp. 114-118, 1998.
- [8] H.G. Lee, W.J. Kim, G.W. Hong, M.H. Lee and H.S. Park, "Position dependence of the deformation state of the ceramic core in Ag/Bi-2223 tapes", Physica C 297, pp. 124 - 132, 1998.
- [9] F.Irie, K.Yamafuji, "AC current loss of a meander-shaped QMG current limit device", J. Phy. Soc. Jpn. 23, pp. 255, 1967.
- [10] J.K. Lee, M.J. Park, S.W. Lee, W.S. Kim, C. Park, H. Lee, S.H. Park, Y.I. Hwang, S.B. Byun, K. Choi, "Effects of striations on magnetization loss of transposed coated conductors", Physica C 468, pp. 1727-1730, 2008.

저 자 소 개



유용수(劉容守)

1981년 1월 6일생, 2004 한국산업기술대학교 졸업, 현 에너지대학원 석사과정.



홍계원(洪啓源)

1956년 4월 3일생, 1978년 서울대학교 공과대학 요업공학과 졸업, 1980년 한국과학기술원 재료공학과 졸업(공학석사), 1983년 동 대학원 재료공학과 졸업(공학박사), 1983 ~ 2001, 한국원자력연구소 근무, 2001 ~ 한국산업기술대학교, 에너지대학원 정교수.



이희균(李喜均)

1958년 3월 1일생, 1981년 서울대학교 공과대학, 금속공학과 졸업, 1983년 한국과학기술원 재료공학과 졸업(공학석사), 1986년 동 대학원 재료공학과 졸업(공학박사), 1987 ~ 2001, 한국원자력연구소, 2001 ~ 2003, 미국 IGC SuperPower, 2003 ~ 한국산업기술대학교 신소재공학과 교수.