

고온초전도 적층선재의 특성과 적층선재로 제작한 팬케이크 권선 손실

論 文
53B-11-3

Characteristics of the HTS Stacked Tapes and AC Losses of the Multi-Stacked Pancake Coil

李昇昱[†] · 林炯佑^{*} · 車貴守^{**} · 李志光^{***}
(Seungwook Lee · Hyoungwoo Lim · Guesoo Cha · Jikwang Lee)

Abstract - According to the improvement of the HTS wires performance, several tapes of HTS superconducting machines are being developed. Stacked HTS tapes are used as conductor that can flow high current for the HTS power machines. To develop the HTS power machines, the critical current characteristics of a stacked HTS tapes in external filed and AC losses should be examined. In this paper, we present characteristic of the stacked HTS tapes and AC losses of HTS pancake windings with stacked tapes. AC loss of the pancake winding were measured and compared with the calculated loss by using AC loss data of the stacked samples and the magnetic flux density in the HTS winding under operating conditions. We can see that measured results generally agree well with the calculated results by using AC loss data of 4-stacked sample.

Key Words : AC Loss, HTS Pancake Winding, Multi-Stacked Tape

1. 서 론

최근에 고온초전도 선재의 성능 향상으로 인하여 고온초전도선재를 이용한 전력기에 많은 관심과 함께 이에 대한 연구가 활발히 진행 중에 있다. 특히 변압기, 전류제한기, 송전케이블 등의 기기가 개발되고있다. 특히 변압기의 경우 초전도선재를 사용함으로써 고효율로 인한 운전비용의 감소와 에너지 절약, 무게감소, 환경친화성 그리고 과부하 내력의 증가 등의 장점이 있다. 하지만 널리 알려진 것과 같이 고온초전도 선재의 임계전류는 자장에 대하여 큰 폭으로 감소하는 특징을 가지고 있다. 고온초전도 선재를 사용하는 전력기의 설계 시 자장의 영향으로 인한 통전전류의 제한은 반드시 고려해야 할 사항이다. 대용량 전력기에서는 대 전류를 요구한다. 따라서 높은 전류를 통전 시키기 위한 방법으로 고온초전도 선재를 병렬로 적층한 초전도선재를 사용하는 방법이 제시되고 있다.[1]

본 논문에서는 고온초전도 선재의 적층 시 발생하는 임계전류 및 교류손실 등의 전기적 특성을 파악하기 위하여 적층 개수를 달리한 적층 샘플을 제작하여 단일 선재와 비교하였다. 또한 코일에서 발생하는 교류손실을 계산하기 위하여 수치해석 방법을 이용하여 초전도 코일에서 발생하는 자

장을 계산하여 수평성분의 자장과 수직성분의 자장으로 나누어 초전도 샘플 교류손실 값을 이용하여 코일의 교류손실을 계산하였다. 계산한 교류손실 값의 타당성을 확인하기 위하여 4적층 선재를 사용한 팬케이크 형상의 코일을 제작하고 전기적 방법으로 교류손실을 측정하여 계산 값과 비교하였다.

2. 고온초전도 선재의 특성

초전도 응용기기의 대용량화에 대한 연구가 진행되고 있는 가운데 초전도 선재에 흐르는 전류용량을 늘리기 위한 방법으로 고온초전도 선재를 적층하여 사용하는 방법이 제시되고 있다. 이에 따라 적층 선재의 전기적 특성을 파악하기 위하여 여러 가지 경우의 적층 샘플을 제작하여 임계전류 특성과 전송전류 손실, 외부자장에 의한 손실을 측정하고 단일 초전도 선재의 특성과 비교하였다.

2.1. 단일 고온초전도 선재 특성

실험에 사용한 초전도 선재는 현재 전력기기 응용에 폭넓게 적용하고있는 BSCCO-2223선재를 사용하였다. 초전도선재의 폭과 두께는 각각 4.1 mm, 0.21 mm이며, 임계전류는 129 A (77 K, 0 T)이다. 임계전류 값의 판단은 널리 사용되고있는 1 $\mu\text{V}/\text{cm}$ 의 기준을 적용하였다. 표 1은 고온초전도 선재의 상세 사양이다.

자장의 크기에 따른 초전도선재의 임계전류 영향을 확인하기 위하여 외부자장을 인가하기 위한 마그넷을 철심과 에나멜 동선을 사용하여 제작하였다. 초전도 샘플이 위치하게 되는 공극 부분은 약 52 mm이다.

[†] 교신저자, 正會員 : 順天鄉大學 電氣工學科 博士課程
E-mail : leeso23@sch.ac.kr

^{*} 正會員 : 順天鄉大學 電氣工學科 博士課程

^{**} 正會員 : 順天鄉大學 電氣工學科 教授 · 工博

^{***} 正會員 : 又石大學 電氣工學科 助教授 · 工博

接受日字 : 2004年 8月 31日

最終完了 : 2004年 10月 1日

표 1. 고온초전도 선재의 사양

Table 1. Specifications of HTS(BI-2223) Tape

재질	BSCCO-2223
선재 폭	4.1 mm
선재 두께	0.21 mm
모재	Ag alloy
트위스트	No
임계전류	129 A (77K, 0T)

공극 부분의 자장 균일성을 확인하기 위해 시편이 위치할 공극의 중앙에서부터 25 mm 간격으로 자장을 측정할 결과 초전도 시편이 위치하는 영역의 자장 변화는 4 %였으며, 240 mT에서 자장의 포화가 발생하였다.

적층 초전도 선재의 임계전류와 비교하기 위해 한 가닥으로 이루어진 단일 고온초전도 선재에서의 I_c - B 특성을 측정하였다. 테이프형 초전도 선재의 이방성을 고려하여 외부자장의 방향을 수평방향 ($\theta=0^\circ$)과 수직방향 ($\theta=90^\circ$)으로 나누어 임계전류를 측정하였다.

측정된 결과를 그림 1에서 보여준다. 수평방향 자장에 의한 임계전류 감소보다 수직방향 임계전류 감소가 큼을 알 수 있으며, 초전도 선재의 자장에 따른 이방성의 특성을 보여준다. 60 mT의 수직방향의 자장이 가해지는 경우 외부자장이 없을 때와 비교하여 임계전류 값이 50 %가량 줄어듦을 확인할 수 있다.

초전도 선재에서 발생하는 교류손실은 초전도 선재를 사용한 전력기기의 효율뿐만 아니라 초전도 권선의 냉각 안정화 한계를 저하시키기 때문에 큰 관심거리중 하나이다. 초전도 선재의 교류손실은 크게 자기자계손실과 자화손실로 나눌 수가 있다. 자기자계손실은 고온초전도 선재에 전송전류가 흐를 때 초전도 선재 주위에 전송전류에 의해 발생한 자기자계가 고온초전도 선재에 부분적으로 침투하여 히스테리시스 형태의 교류 손실이며, 자화손실은 초전도체에 외부로부터 자장이 인가되면 초전도체의 히스테리시스 특성에 의해서 발생한 교류손실이다.

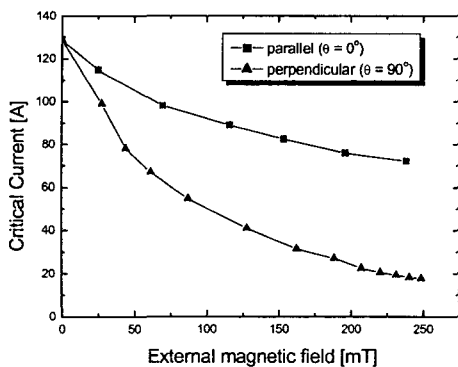


그림 1. 단일 고온초전도 선재의 I_c - B

Fig. 1 I_c - B curve of single HTS tape with different angles of external magnetic field

전송전류 손실측정은 초전도 선재에 흐르는 전류와 전압을 측정해서 전류와 전압을 적분하여 순시전력을 계산한 후 이를 1주기 T초 동안 적분하여 단위시간당 평균손실을 구하는 다음과 같은 식을 이용하여 구할 수 있다.

$$Q_{sf} = \frac{1}{T} \int_0^T I(t) \cdot V(t) \cdot dt \quad (1)$$

위와 같은 방법으로 측정된 전송전류 손실은 타원형 Norris 방정식을 이용하여 계산한 손실 값과 비교하였다.[2]

$$P(F) = \left(\frac{\mu_0 I_c^2 f}{\pi} \right) \cdot \left[(1-F) \ln(1-F) + (2-F) \frac{F}{2} \right] [W/m] \quad (2)$$

여기에서 f 는 전원주파수를 나타내며, $F=I_p/I_c$ 이며, I_c 와 I_p 는 각각 임계전류와 전송전류의 최대치이다.

그림 2는 단일 고온초전도 선재의 전송전류손실 측정값과 타원형 Norris 방정식을 이용하여 계산한 손실 값을 보여준다. 사각형 심벌로 나타낸 것이 측정값이며, 실선은 타원형 Norris 방정식을 이용한 계산 값이다.

자화손실 측정은 시편에 외부자장을 인가하여 픽업코일에 초전도 시편에 에서 발생하는 전압을 픽업 코일을 통하여 측정한다. 자화손실 Q_m 은 일반적으로 다음 식으로 표현된다.

$$Q_m = \oint \vec{m} \cdot d\vec{B} = \oint \vec{B} \cdot d\vec{m} \quad (3)$$

여기에서 \vec{m} 은 샘플의 전체 자기모멘트이며, \vec{B} 는 샘플에 가해지는 외부자장이다. 자화손실은 픽업코일에서 발생된 전압에 의하여 측정되어진다. 따라서 식 (3)은 전체 자기모멘트와 외부 자장을 대신하여 전압과 전류의 형태로 나타낼 수 있으며 단위는 한 주기당 단위체적당의 손실로 나타내면 식 (4)와 같다.

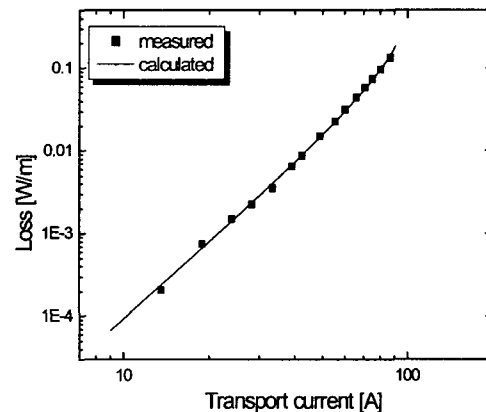


그림 2. 단일 선재에서의 전송전류 손실

Fig. 2 Transport current loss of single HTS tape

$$Q_m = \frac{C_{pu}k}{V_s} \int_T^{\rho} v(t) \cdot i(t) dt \quad (4)$$

여기서 k 는 자석상수이며, V_s 와 C_{pu} 는 각각 샘플의 체적과 픽업코일의 측정상수이다.

초전도체의 이방성 특징으로 인하여 외부자장이 초전도 선재에 인가되는 방향에 따라 다른 손실 특징이 나타나므로 고온초전도 선재에 인가하는 외부자장의 크기와 각도를 변화시킬 때에 초전도 단일 선재에서 발생하는 자화손실을 그림 3에서 보여준다. 심별로 표현된 것이 측정값이며, 실선과 점선으로 나타낸 것이 각각 slab 모델과 strip 모델을 이용하여 계산한 자화손실 값이다. 수직방향자장에 의한 손실 값이 수평방향 자장에 의한 손실 값보다 매우 큼을 알 수 있다. 100 mT의 외부자장인가 시 수직방향손실과 수평방향 손실의 값은 약 22배의 차이를 보였으며, 초전도 선재의 자화손실의 경우 수직방향 자장에 대한 영향이 크다는 것을 알 수 있다.

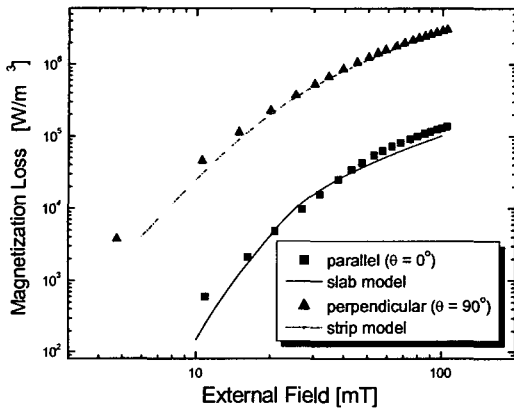


그림 3. 단일 선재에서의 자화 손실

Fig. 3 Magnetization loss of a single HTS tape

2.2 적층 고온초전도 선재의 특성

적층 초전도 샘플 제작에 사용한 초전도 선재는 표 1의 사양과 같으며, 적층 개수에 따른 영향을 확인하기 위하여 3 종류의 적층 샘플을 제작하였다. 제작한 적층 샘플의 층간 절연은 50 μ m의 두께를 가지는 polyimid 필름을 이용하였다. 표 2는 실험에 사용된 적층 샘플의 사양이다.

적층 샘플의 임계전류 값 판단은 샘플을 구성하고 있는 각 선재의 임계전류는 인접 초전도 선재에서 발생하는 자장의 영향에 의해 서로 다른 임계전류 값을 가진다. 하지만, 적층 샘플에 흐르는 전류가 높아질수록 각 선재에 흐르는 전류 량의 차이가 작아지며, 전압탭의 위치를 샘플의 양쪽 바깥 표면에 인듐을 이용하여 접합한 곳의 임계전류 값과 적층 샘플을 구성하고 있는 각 선재에서 모두 임계전류가 발생하는 시점과 동일하였다. 따라서 본 논문에서는 적층 샘플의 임계전류 판단을 적층 샘플의 양쪽 바깥표면에서 측정된 전압을 기준으로 삼았다.

표 2. 고온초전도 적층 선재의 사양

Table 2. Specifications of stacked HTS Tapes

	sample 1	sample 2	sample 3
적층 개수	2	3	4
임계전류(at 77 K)	222 A	305 A	381 A
층간 절연	○	○	○

각 샘플에서 측정된 임계전류 값을 단일 선재의 임계전류 값에 적층 개수를 곱한 값과 비교할 때 적층 개수가 늘어날수록 적층 샘플의 임계전류의 비가 샘플 1의 경우 86% 샘플 2, 3의 경우 각각 78%, 73%로 감소함을 알 수 있다.

적층 샘플의 임계전류 값이 단일 선재의 임계전류 값을 4배한 값보다 낮다. 이는 적층에 사용된 초전도 선재에 전류가 흐르면서 발생한 자장이 인접 초전도선재에 영향을 주기 때문이다. 하지만 적층 개수가 증가할수록 적층 샘플의 임계전류 값이 단일 선재의 임계전류 값의 곱과 비교하여 임계전류 값은 적층 개수가 늘어날수록 감소하나 감소폭은 줄어든다.

그림 4와 5는 초전도 선재 4가닥을 사용하여 제작한 적층 샘플 3과 단일 선재의 외부자장의 각도에 따른 임계전류 결과이다. 단일 선재의 임계전류 값과 적층 선재의 임계전류 값이 다르므로 비교를 하기 위해서 외부자장이 인가되지 않은 전류를 기준으로 일반화하여 표현하였다.

외부자장이 수평, 수직으로인가 될 경우 자장의 크기에 따른 적층 샘플의 임계전류 감소를 단일 선재와 비교하여 그림 4와 5에서 보여준다.

수평방향의 자장이 인가되었을 경우 적층 선재와 단일 선재의 자장에 따른 임계전류 값의 결과가 큰 차이를 보이고 있다. 이는 초전도 선재의 적층 시 나타나는 차폐효과에 의한 현상이다. 수직방향 자장이 인가되었을 경우에는 임계전류 값에 큰 차이가 없었다.

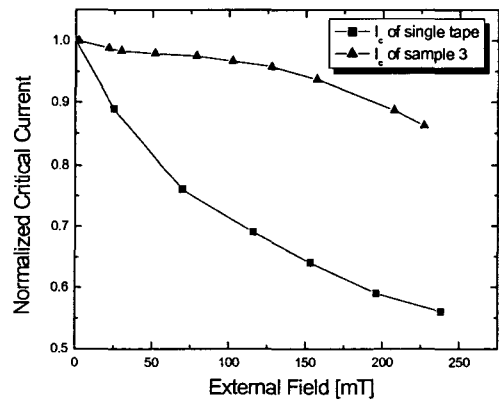


그림 4. 수평방향 자장에 대한 4적층 선재의 임계전류

Fig. 4 Critical current of Bi-2223 4-stacked superconducting under parallel external magnetic field

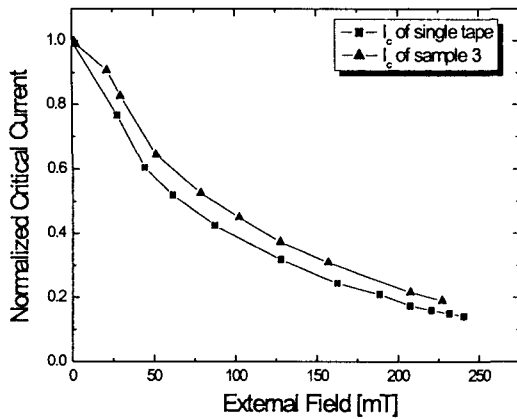


그림 5. 수직 방향 자장에 대한 4적층 선재의 임계전류
 Fig. 5 Critical current of Bi-2223 4-stacked superconducting tape under perpendicular external magnetic field

적층 샘플에서 측정된 전송전류 손실을 그림 6에서 보여 준다. 단일 선재와 마찬가지로 적층 샘플에서 측정된 임계전류 값을 이용하여 타원형 Norris 방정식과 비교하였다. 적층 개수가 늘어날수록 단위 길이 당 손실 증가 비율이 감소함을 알 수 있다. 적층 수에 따른 전송전류의 영향을 확인하기 위하여 전송전류 값을 각 샘플의 임계전류를 기준으로 일반화하여 나타내었다. 적층 샘플의 경우 전류가 낮은 부분에서 계산식과 약간의 오차가 발생하는데 이것은 적층선재의 전류 불균일성에 의한 영향으로 보여지며, 전류가 높은 부분에서는 계산식과 잘 일치함을 알 수 있다.

그림 7은 3개의 적층 샘플에 수직방향 외부자장을 인가시켰을 때의 자화손실을 보여주며, 전원 주파수는 60 Hz이다. 샘플의 적층 개수가 증가할수록 단위 체적 당 자화손실이 줄어듦을 알 수 있다.

3. 팬케이크 권선의 교류 손실 계산

교류손실은 크게 전송전류손실과 외부자장에 의한 자화손실로 표현할 수 있다. 전송전류손실은 일반적으로 Norris 식을 이용하여 계산하며, 외부자장에 의한 자화손실은 초전도 선재에 가해지는 자장의 방향에 따라 손실 값이 크게 달라지므로 초전도 선재에 가해지는 자장을 초전도 선재의 좁은 면으로 가해지는 수평방향 자장과 초전도 선재의 넓은 면으로 가해지는 수직방향자장으로 나누어 slab모델과 strip모델을 이용하여 자화손실을 계산한다. 일반적으로 전송전류 손실 보다 자화손실의 값이 크기 때문에 권선의 교류손실 계산은 자화손실 만을 이용하여 계산을 하였다.

초전도 선재를 사용하여 제작한 팬케이크 권선에서 발생하는 교류손실 계산은 초전도 권선에 통전 전류가 흐를 때 초전도선재에 인가되는 자장을 유한요소프로그램을 이용하여 수평성분과 수직성분의 자장 값을 계산한 후 계산된 자장 값에 대한 손실 값을 외부자장의 크기에 따른 초전도 샘플의 손실 값을 이용하여 계산하였다. 수직 성분 자장에 의한 손실 계산은 적층 샘플의 교류 손실 측정값을 이용하여

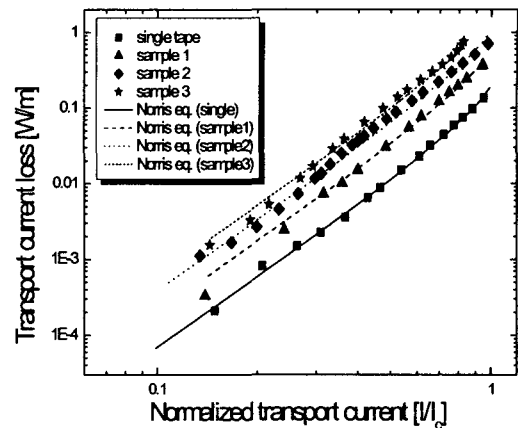


그림 6. 적층 샘플의 전송전류 손실
 Fig. 6 Transport current loss of stacked sample

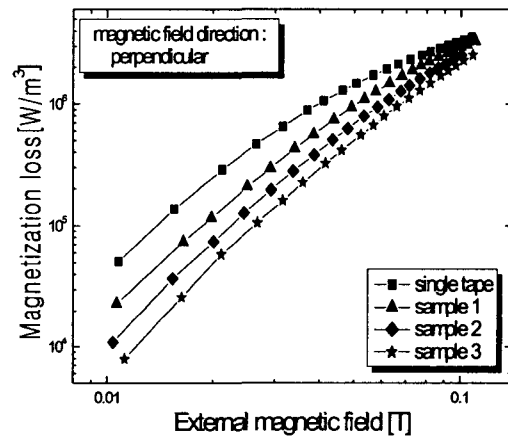


그림 7. 수직 외부자장에 의한 적층 샘플의 자화손실
 Fig. 7 Measured magnetization loss of stacked samples under perpendicular external magnetic field

계산하였으며, 수평성분 자장에 의한 손실은 적층에 대한 효과가 크지 않다고 판단하여 slab모델을 이용하여 권선에 발생하는 교류손실을 계산하였다. 따라서 팬케이크 권선의 교류손실 계산은 어떤 적층 샘플의 교류 손실 값을 이용하느냐에 따라 다른 결과 값이 나온다. 예를 들어 팬케이크 권선에 140 A의 전류를 흘렸을 때 발생하는 교류 손실 계산 값은 단일 샘플의 실험 값을 적용하였을 경우 56.2 W이며, 샘플 3의 실험 값을 적용하였을 경우 팬케이크 권선의 손실은 26.4 W로 단일샘플을 이용한 팬케이크 권선 손실과 대략 30 W의 계산 값의 차이를 보였다. 초전도 선재를 권선의 형태로 제작하게 되면 초전도 선재와 선재간에 자장 차폐효과가 발생하게 될 것이며, 이 현상을 고려하여 손실을 계산하기 위해서는 단일 선재에서 측정된 결과 값을 이용하여 권선을 계산하는 것보다 적층 샘플을 이용하여 권선의 교류손실을 계산하는 것이 더욱 정확하게 교류손실을 계산할 수 있을 것이다.

4. 팬케이크 권선 제작과 손실 측정

제작한 적층 팬케이크 권선의 손실을 측정하여 교류손실 계산 결과와 비교하여 교류손실 해석의 타당성을 살펴보았다. 팬케이크 권선은 초전도 선재 4가닥을 병렬로 적층하여 제작하였으며, 4가닥 초전도 선재는 각각 50 μm 두께의 polyimid 필름으로 절연을 하여 권선 하였다.

표 3은 4적층 선재로 제작한 권선의 사양이다. 권선 제작에 사용된 실제 초전도 선재의 길이는 76 m이다. 제작한 초전도 권선은 내측 지름이 182 mm, 외측지름이 202 mm인 보빈에 4적층 선재를 이용하여 권선을 하였으며, 보빈의 재질은 G-10 FRP이다. 제작된 팬케이크 권선에서 임계전류 측정 및 교류 손실을 측정하기 위하여 4적층 선재의 안쪽과 바깥쪽에 전압 탭을 연결하였다. 권선의 임계전류 값의 판단은 1 $\mu\text{V}/\text{cm}$ 의 기준을 적용하여 측정하였다.

고온초전도 팬케이크 권선에서의 손실 측정은 권선에 전송전류를 흘리는데 필요한 전압에 의하여 표현되어지며, 이 전압성분은 교류전류와 동상의 전압 성분이다. 따라서 전기적 방법을 사용한 고온초전도 팬케이크 권선의 손실 측정은 권선에 인가된 전류성분과 동상인 전압성분을 측정하여 이 성분의 곱으로 교류 손실이 측정된다.

전기적 방법을 이용한 초전도 권선의 교류손실 측정 시험 회로를 그림 8에서 보여준다. 초전도 권선의 교류손실 측정 시험은 팬케이크 권선에 부착된 전압 탭과 초전도 권선에 흐르는 전류를 측정하여 이들의 곱으로 교류손실을 측정하게 된다.

표 3 팬케이크 코일의 사양

Table 3. Specifications of Pancake coil

항 목	권선
권선 수	26 Turns
권선 길이	76 m
임계 전류	284 A (77 K)
인덕턴스	270 μH

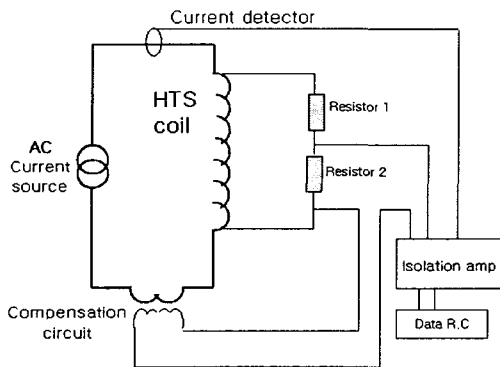


그림 8. 전기적 방법을 이용한 권선 교류손실 측정시험 회로도

Fig. 8 Schematic of the measurement circuit by using electric method

권선의 경우 전압탭에서 측정되는 전압이 매우 크기 때문에 보상 코일을 사용하여 유도성 성분의 전압을 제거하기가 어렵다 따라서 저항을 이용하여 초전도 권선의 전압 값을 보상코일을 사용하여 조절할 수 있을 정도의 전압 값으로 낮추어 교류손실을 측정한다.

그림 9는 전기적 방법을 이용하여 초전도 선재 4가닥을 병렬로 적층하여 제작한 팬케이크 권선의 교류손실을 측정 한 결과와 팬케이크 권선을 유한 요소법을 이용하여 자장 계산한 후 적층 샘플의 개수에 따른 교류손실 측정값을 이용하여 계산한 권선 손실이다. 적층 샘플에서 측정된 손실 값은 심벌로 나타내었으며, 샘플 손실 값을 이용하여 계산한 결과는 선으로 나타내었다. 손실 계산에 사용한 초전도 권선의 길이는 동일하다.

팬케이크 권선의 손실 측정 결과와 계산 결과의 비교할 때 샘플 3의 손실 측정값을 사용하여 계산한 권선 손실 값이 측정값에 근접함을 알 수 있다. 또한 제작된 팬케이크 권선에 교류전송전류 140 A를 인가했을 때에 전기적 방법을 이용하여 측정된 손실 값은 24.7 W였다. 계산된 권선 손실 값과 비교하여 보면 샘플 3의 손실 값을 이용한 계산 값이 측정값과 일치함을 알 수 있으며, 샘플 3의 교류손실 값을 이용하여 계산한 결과는 적층 팬케이크 권선의 임계전류의 40 %이상의 전류에서 측정값과 10 %의 오차를 보였다.

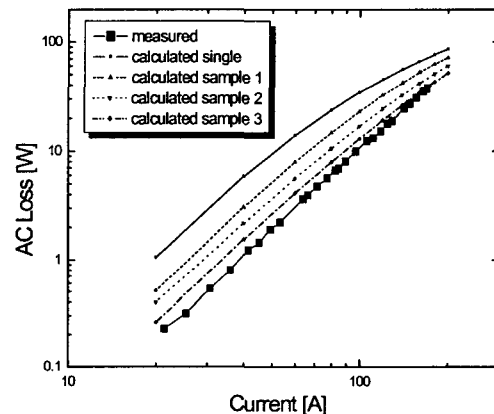


그림 9. 적층 팬케이크 권선의 교류손실

Fig. 9 Comparison of measured and calculated losses with stacked sample data

5. 결 론

높은 전류를 통전 시키기 위한 방법으로 사용되고 있는 적층 선재의 임계전류는 단일 선재의 임계전류 값의 배수가 되지 않고 감소하는 것을 알 수 있다. 하지만, 이 감소율은 자장의 크기가 클수록 감소하며, 수직방향 자장이 초전도선재에 인가되는 경우 적층 선재의 임계전류가 단일 선재의 임계전류 값의 적층 개수에 상당하는 배수보다 증가하므로 높은 전류를 통전 시키기 위한 방법으로 적층 선재의 사용이 가능하다고 본다.

고온초전도 선재를 사용한 전력기기에서 교류손실은 전력

기기의 효율뿐만 아니라 고온초전도 권선의 냉각 안정화 한계 또한 저하시키기 때문에 중요하게 고려되어야 할 사항이다. 따라서 본 논문에서는 초전도 팬케이크형 권선에서 발생하는 교류 손실을 정확하게 계산하기 위하여 초전도 선재의 차폐효과를 고려한 적층 샘플 손실 값을 이용하여 권선의 교류 손실 값을 계산하였다. 계산방법의 신뢰성을 확인하기 위하여 해석에 사용한 초전도 팬케이크 권선을 제작하고 전기적 방법을 사용하여 교류손실을 측정하여 비교하였다.

초전도 적층 샘플에서 측정한 교류손실 값을 이용하여 권선 손실을 계산할 경우 단일 선재의 손실 값을 사용하는 것보다 초전도 선재와 선재간의 차폐효과를 고려하여 적층된 샘플에서 측정한 손실 값을 이용함으로써 초전도 권선 손실을 보다 정확하게 계산할 수 있음을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 차세대 초전도 응용기술 개발사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- [1] J. Lee and G. Cha, "AC Loss Calculation of a Multi-Layer HTS Transmission Cable Considering the Twist of Each Layer," IEEE Trans. Applied Superconductivity, Vol.11, No.1, pp.2433-2436, 2001
- [2] 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
- [3] C.P. Bean, "Magnetization of Hard Superconductor," Physical Review Letters, Vol.8, No.6, pp.250-253, 1962
- [4] W.J. Carr, AC Loss and macroscopic theory of superconductors, Gordon and Breach Science Publishers, NewYork, 1983.
- [5] J. Rhyner, "Calculation of AC losses in HTSC wires with arbitrary current voltage characteristics," Physica C, Vol.310, pp.42-47, 1998
- [6] M. Wilson, Superconducting magnet, Clarendon Press, New York, 1983
- [7] E.H. Brandt and M. Indenbom, "Type-II superconductor strip with current in a perpendicular magnetic field," Phys. Rev.B, Vol.48, pp.12893-12906, Nov., 1993
- [8] N. Magnusson and S. Hornfeldt, "Losses in HTS Carrying AC Transport Currents in AC External Magnetic Fields," IEEE Trans. on AS, Vol.9, No.2, pp.785-788, 1999

저 자 소 개



이 승 옥(李昇昱)

1973년 12월 23일생. 1999년 순천향대 공대 전기공학과 졸업, 2001년 동대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동대학원 전기공학과 박사과정

Tel : 041-531-0334, Fax : 041-530-1548
E-mail : leeso23@sch.ac.kr



임 형 우(林炯佑)

1972년 1월 18일생. 2000년 순천향대 전기공학과 졸업. 2002년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 박사과정

Tel : 041-530-1334, Fax : 041-530-1548
E-mail : super@sch.ac.kr



차 귀 수(車貴守)

1956년 7월 18일생, 1978년 서울대 공대 공업교육학과 졸업, 1987년 동대학원 전기공학과 졸업(공학박사), 1987년 순천향대 조교수, 현재 순천향대 공대 정보기술공학부 교수 및 MIT 방문교수.

Tel : (USA) 1-617-864-4535
E-mail : gsoocha@sch.ac.kr



이 지 광(李志光)

1966년 6월 1일생. 1989년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1992년 동대학원 전기공학과 졸업(석사). 1997년 동대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 현재 우석대 전기공학과 부교수

Tel : 063-290-1476, Fax : 063-290-1475
E-mail : jikwang@woosuk.ac.kr