

고온초전도 적층선재의 손실과 적층선재로 제작한 팬케이크 권선의 손실

이승욱, 김용섭, 이희준, 차귀수, 이지광*
 Soonchunhyang University 전기공학과, Woosuk University 전기공학과*

AC Losses of the Multi-stacked HTS tapes and Pancake Coil

Seung-Wook Lee, Yong-Sub Kim, Hee-Joon Lee, Gueesoo Cha, Ji-Kwang Lee*
 Soonchunhyang University, Woosuk University*

Abstract - In this paper, we present effect of the stacked HTS tapes. AC losses of HTS pancake windings with stacked tapes are shown. Magnetic flux density in the HTS winding under operating conditions was calculated by FEM. AC loss of the pancake winding were measured and compared with the calculated loss by using AC losses of the stacked samples. Test results show that measured results generally agreed well with the calculated value by using AC loss of 4-stacked sample data.

적층 샘플 개수에 따른 임계전류를 비교하기 위해서 단일 초전도선재의 임계전류 기준으로 단순히 적층 개수를 곱한 임계전류와 샘플에서 측정된 임계전류 비를 사용하였다.

그림 1은 적층 샘플의 일반화된 임계전류를 보여주며, 적층의 가닥수가 많을수록 임계전류가 떨어짐을 알 수 있다. 적층 샘플에서 임계전류 감소는 적층에 사용된 선재에 전류가 흐르면서 발생한 자장이 인접 선재에 영향을 주기 때문이다. 적층 수에 따라 임계전류 값은 감소하나 감소 폭은 줄어든다는 것을 확인할 수 있다.

적층 샘플에서 측정된 전송전류 손실을 노리식을 이용한 계산 결과와 비교하여 그림 2에서 보여준다.

1. 서 론

최근 77K에서 100A 이상의 임계전류를 가지는 선재가 개발됨에 따라 송전케이블, 전류제한기, 변압기와 같은 전력 응용 기기의 초전도 선재의 적용이 가속화되고 있다. 하지만 널리 알려진 것과 같이 고온초전도 선재의 임계전류는 자장에 대하여 큰 폭으로 감소하는 특징을 가지고 있다. 고온초전도 선재를 사용한 전력 응용기기에서 자장에 의한 임계전류의 감소에 따른 통전전류의 제한은 대용량 전력응용 기기의 설계에 제한을 가지게 된다. 따라서 높은 전류를 통전 시키기 위한 방법으로 고온초전도 선재를 병렬로 적층한 선재를 사용하는 방법이 제시되고 있으며, 이에 대한 임계전류특성, 교류손실 특성 등을 파악하는 것이 필요하다.

본 논문에서는 적층 선재의 개수에 따른 임계전류 변화, 전송전류 손실, 외부자장 손실을 단일 선재와 비교하였다. 또한 4적층 선재를 사용하여 팬케이크 권선을 제작하였으며, 제작된 팬케이크 권선의 교류손실 해석은 수치적 방법을 이용하여 팬케이크 권선에서 발생하는 자장을 수평, 수직성분 자장으로 나누어 계산한 후 적층 샘플의 개수에 따른 손실 결과를 이용하여 팬케이크 권선의 교류손실을 계산하였다. 계산 방법의 신뢰성을 확인하기 위하여 해석에 사용한 초전도 팬케이크형 코일을 제작하고 전기적 방법을 사용하여 교류손실을 측정하여 이를 계산 값과 비교하였다.

2. 고온초전도 적층선재의 특성

고온초전도 선재의 적층에 따른 초전도 선재 특성을 파악하기 위하여 적층 샘플을 제작하여 임계전류특성과 전송전류 손실, 외부자장에 의한 자하손실을 측정하였다.

적층 샘플 제작에 사용된 초전도 선재는 Bi-2223이며, 모재는 은 합금으로 제작되었다. 선재의 폭과 두께는 각각 4.1mm, 0.21mm이고 필라멘트는 트위스트 되어있지 않다. 77K 외부자장이 없는 상태의 임계전류는 129A이다. 임계전류 값의 판단은 널리 사용되고있는 1 μ V/cm의 기준을 적용하였다. 표 1은 실험에 사용된 샘플의 사양이다. 층간 절연은 두께 50 μ m의 두께를 가지는 캡톤 테이프를 이용하였다.

표 1. 적층 샘플의 사양

	sample 1	sample 2	sample 3	sample 4
적층 개수	1	2	3	4
임계전류	129A	222A	305A	381A
층간 절연	.	○	○	○

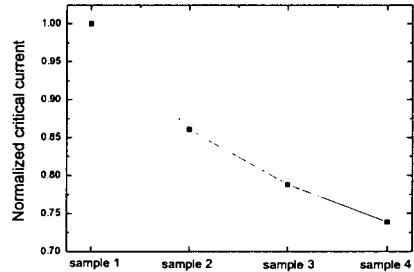


그림 1. 적층 샘플의 임계전류

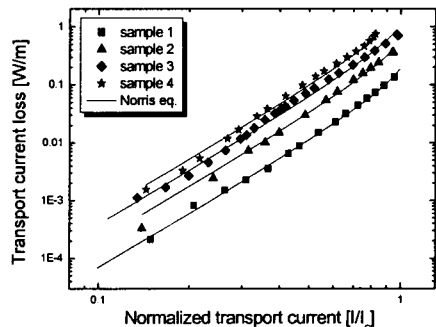


그림 2. 적층 샘플의 전송전류 손실

적층 샘플의 전송전류 손실은 노리스 식과 잘 일치함을 알 수 있으며, 적층 개수가 늘어날수록 단위 길이 당 손실 증가 비율이 감소함을 알 수 있다.

그림 3은 적층 샘플의 수직방향 외부자장에 따른 자화손실 측정 결과이다. 적층의 개수가 많을 수록 단위 체적 당 손실이 줄어들음을 알 수 있다.

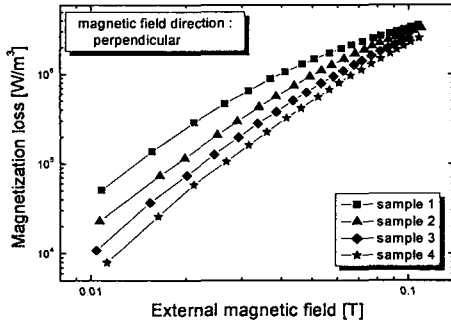


그림 3. 수직 외부자장에 의한 적층 샘플의 자화손실

3. 팬케이크 권선의 교류 손실 계산

교류손실은 크게 전송전류에 의한 전송전류손실과 외부자장에 의한 자화손실로 표현할 수 있다. 전송전류손실은 일반적으로 노리스 식을 이용하여 계산되어지며, 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.

본 논문에서는 초전도 권선에 통전 전류가 흐를 때 초전도선재에 인가되는 자장을 유한요소프로그램을 이용하여 수평성분과 수직성분으로 나누어 계산한 뒤 수직 성분 자장에 의한 손실은 초전도 선재의 적층 개수에 따른 샘플의 교류 손실 측정값을 이용하여 계산하였으며, 수평성분 자장에 의한 손실은 적층에 대한 효과가 크지 않다고 판단하여 slab모델을 이용하여 권선에 발생하는 교류손실을 계산하였다.

그림 4는 팬케이크 권선을 유한 요소법을 이용하여 자장 계산한 후 적층 샘플의 개수에 따른 교류손실 측정값을 이용하여 계산한 권선 손실이다. 같은 길이를 가지는 팬케이크 권선의 교류손실 값은 적층 수의 증가에 따라 감소하는 것을 확인 할 수 있다.

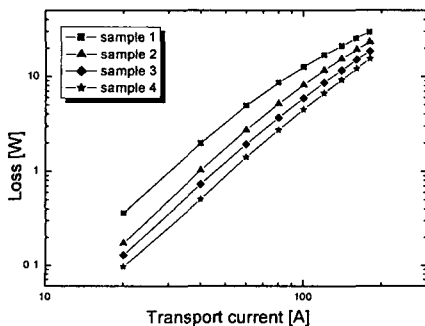


그림 4. 팬케이크 권선의 교류손실

팬케이크 권선에 180A의 전류를 흘렸을 때 발생되는 교류 손실 계산 값은 샘플 1의 실험 값을 적용하였을 경우 29.3W로 계산되었으며, 샘플 4의 실험 값을 적용하였을 경우 15W로 14W의 교류손실 계산 값의 차이를 보였다.

4. 팬케이크 권선 제작과 손실 측정

초전도 선재 4가닥을 병렬로 적용한 선재를 이용하여 적층 초전도 팬케이크 권선을 제작하였다. 4가닥 초전도 선재는 각각 50 μ m 두께의 캡톤 테이프로 절연을 하여 권선 하였다.

표 2는 제작된 4적층된 권선의 사양이다. 권선 A의 경우 실제 사용된 초전도 선재의 길이는 76m이며, 권선 B의 실제 사용된 초전도 선재 길이는 36m이다.

권선의 임계전류 값의 판단은 1 μ V/cm의 기준을 적용하여 측정하였다.

표 2 팬케이크 코일의 사양

항 목	권선 A	권선 B
권선 수	26Turns	13Turns
권선 길이	76m	36m
임계 전류	284A (77K)	278A (77K)
인덕턴스	270 μ H (60Hz)	74 μ H (60Hz)

그림 5는 제작된 권선 A의 팬케이크 형상이다. 제작된 초전도 권선은 내측 지름이 182mm, 외측지름이 202mm인 보빈에 적층 선재를 권선을 하였으며, 보빈의 재질은 G-10 FRP이다. 제작된 팬케이크 권선에서 임계전류 측정 및 교류 손실을 측정하기 위하여 4적층 선재의 안쪽과 바깥쪽에 전압 탭을 연결하였다.

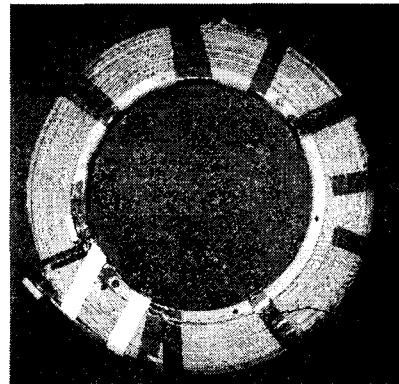


그림 5. 제작된 적층 팬케이크 권선

제작된 적층 팬케이크 권선의 손실을 측정하여 교류 손실 계산 결과와 비교하여 교류손실 해석의 타당성을 검증하였다.

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 전압 성분을 측정하여 이 성분의 곱으로 교류 손실이 측정된다. 그림 6은 전기적 방법을 이용한 교류손실 측정 시험 회로이다.

4. 결 론

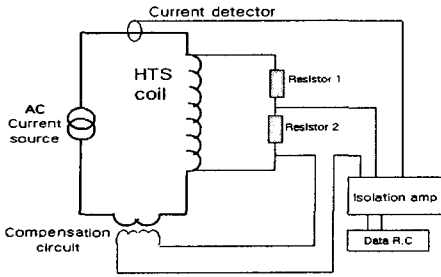


그림 6. 전기적 방법을 이용한 권선 교류손실 측정 시험 회로도

그림 7은 전기적 방법을 이용하여 초전도 선재 4가닥을 병렬로 적층하여 제작한 팬케이크 권선 A, B의 교류손실을 측정된 결과와 적층 샘플에서 측정된 손실 값을 이용하여 계산한 팬케이크 권선 손실 값과 비교하였다.

손실 계산에 사용된 권선의 길이는 동일하며 샘플 4의 손실 측정값을 사용하여 계산한 팬케이크 권선 손실 값이 측정값과 근접함을 알 수 있다.

권선 A의 경우 교류전송전류 160A인가 시 전기적 방법을 이용하여 측정된 손실 값은 32W이며 샘플 4를 이용하여 계산한 손실 값은 34W로 계산되었으며, 권선 B의 경우 측정된 손실 값은 13W, 계산된 값은 15W였다. 샘플 4의 교류손실 값을 이용하여 계산한 결과는 적층 팬케이크 권선의 임계전류의 40%이상의 전류에서 측정값과 10%의 오차를 보였다.

높은 전류를 통전 시키기 위한 방법으로 사용되고 있는 적층선재의 임계전류는 단일 선재의 임계전류 값의 배수가 되지 않고 감소하는 것을 알 수 있다. 하지만 이 감소율이 적층 개수가 늘어날수록 감소하므로 높은 전류를 통전 시키기 위한 방법으로 적층 선재의 사용이 가능하다고 보여진다. 고온초전도 선재를 사용한 전력기에서 교류손실은 전력기의 효율뿐만 아니라 고온초전도 권선의 냉각 안정화 한계 또한 저하시키기 때문에 중요하게 고려되어야 할 사항이다.

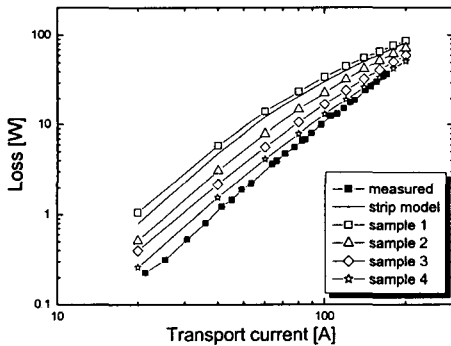
본 논문에서는 초전도 권선에서 발생하는 손실계산을 초전도 선재의 적층 개수에 따른 샘플에서 발생하는 교류 손실 값을 이용하여 계산하였다. 계산방법의 신뢰성을 확인하기 위하여 해석에 사용한 초전도 팬케이크 권선을 제작하고 전기적 방법을 사용하여 교류손실을 측정하여 비교하였다.

샘플에서 측정된 교류손실 값을 이용하여 권선 손실을 계산할 경우 단일 선재의 손실 값을 사용하는 것보다 적층된 샘플에서 측정된 손실 값을 이용하는 것이 초전도 권선 손실을 보다 정확하게 계산하였다. 또한 적층선재를 사용하는 것이 단순하게 전송전류를 높이는 효과뿐만 아니라 고온초전도 선재를 사용한 초전도 팬케이크 권선의 손실을 줄이는 역할을 한다.

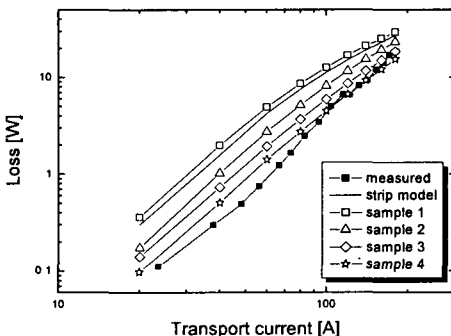
본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 차세대초전도용융기술개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

[참 고 문 헌]

- [1] C.P. Bean, "Magnetization of Hard Superconductor," Physical Review Letters, Vol.8, No.6, pp.250-253, 1962
- [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] W.J. Carr, AC Loss and macroscopic theory of superconductors, Gordon and Breach Science Publishers, New York, 1983.
- [4] J. Rhyner, "Calculation of AC losses in HTSC wires with arbitrary current voltage characteristics," Physica C, vol.310, pp.42-47, 1998
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] M. Wilson, Superconducting magnet, Clarendon Press, New York, 1983
- [8] 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
- [9] J.R.T. Lehtonen et al., "AC Losses in magnets wound of HTS Tape Conductors", Advances in Cryogenic Engineering, Vol. 46, pp. 839-849, 2000



(a) 권선 A



(b) 권선 B

그림 7. 적층 팬케이크 권선의 교류손실