

전기적 측정법을 사용한 팬케이크 코일에서의 교류손실 측정

이승욱, 임형우, 최명섭, 이희준, 차귀수, 이지광*
순천향대학교 전기공학과, 우석대학교 전기공학과*

AC Losses of the HTS Pancake Coil by Using Electric Method

Seung-Wook Lee, Hyoung-woo Lim, Myeong-Seob Choi, Hee-Joon Lee,
Gueesoo Cha, Ji-Kwang Lee*
Soonchunhyang University, Woosuk University*

leeso23@sch.ac.kr

Abstract This paper presents calculated and measured AC losses of the HTS pancake coil. Magnetic field in the HTS coil under operating conditions was calculated by FEM. Results of measured ac loss in 4-stacked short sample were used in the AC loss calculation. Various methods, such as, electric method, calorimetric method, wattmeter method, were used to measure the AC loss.

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 개발되고 있다. 특히 변압기의 경우 초전도선재사용의 장점은 고효율로 인한 운전비용의 감소와 에너지 절약, 무게감소, 환경친화성 그리고 과부하 내력의 증가를 들 수 있다. 하지만 이들 기기들에 사용되는 초전도 선재는 교류 환경에서 사용되기 때문에 초전도 선재에 교류손실이 발생하게 된다.

초전도 선재를 사용한 전력기에서 발생하는 교류손실은 효율뿐만 아니라 초전도 권선의 안정화 한계를 저하시키기 때문에 전력기 설계 시에 중요하게 고려되어야 할 사항이다. 따라서 고온초전도 선재를 사용한 전력기를 교류환경에서 사용하기 위해서는 교류손실에 대한 해석이 반드시 필요하다. 그동안 시편에서의 교류손실에 관한 연구결과는 발표된 것이 많지만 코일에서 발생하는 교류손실에 관한 연구는 발표된 것이 많지 않다. 본 논문에서는 코일에서 발생하는 교류손실을 계산하기 위하여 수치해석 방법을 이용하여 초전도 코일에서 발생하는 자장을 계산하여 수평성분의 자장과 수직성분의 자장으로 나누어 교류손실을 계산하였다.

계산된 교류손실 값의 타당성을 확인하기 위하여 팬케이크 형상의 코일을 제작하여 측정된 손실 값과 비교하였다.

2. 수치적인 교류손실 계산

고온초전도 선재의 전체 교류손실은 전송전류에 의한 전송전류손실과 외부자장에 의한 자화손실의 합으로 표현할 수 있다. 전송전류손실 계산은 널리 알려져 있는 노리스 식을 이용하여 계산한다. 특히 자화손실의 경우 초전도선재에 가해지는 자장의 방향에 따라 손실 값이 크게 달라지므로 초전도 선재에 가해지는 자장을 선재의 좁은 면으로 가해지는 수평방향 자장과 선재의 넓은 면으로 가해지는 수직방향자장으로 나누어 교류손실을 계산한다. 본 논문에서는 교류손실 중에서 자화손실의 값이 전송전류손실 보다 매우 크므로 전송전류에 의한 손실은 고려를 하지 않고 자화손실 값만 고려하여 선재에서 발생하는 교류손실을 계산하였다. 자화손실의 계산은 초전도 코일에 전류인가 시 초전도선재에 인가되는 자장을 유한요소프로그램을 이용하여 수평성분과 수직성분으로 나누어 4cm 길이의 샘플에서 측정된 자화손실밀도 값을 이용하여 코일의 교류손실을 계산하였다.

그림 1은 코일제작에 사용한 4적층 초전도 선재의 수직방향 자장에 따른 자화손실밀도를 보여준다.

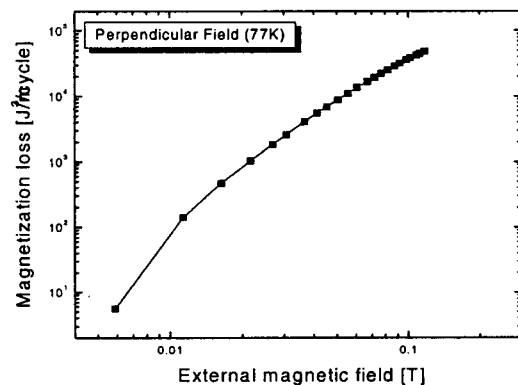


Fig. 1. Magnetization loss in a 4 stacked short sample

3. 팬케이크 코일 제작

초전도 팬케이크 코일 제작에 사용된 선재는 BSCCO계열의 트위스트 되지 않은 필라멘트구조를 가진다. 선재의 단면적은 $4.1\text{mm} \times 0.2\text{mm}$ 이고, 임계전류는 120A (77K , 0T)이다. 변압기 형태에서의 손실을 고려하기 위하여 두개의 팬케이크 코일을 제작하였으며 각 코일은 초전도 선 4가닥을 병렬로 적층하여 사용하였다. 적층선재의 절연은 각각의 초전도 선재는 $50\mu\text{m}$ 두께의 캡톤 테이프로 절연하였으며, 턴 절연은 0.2mm 의 복합비닐절연 테이프를 사용하였다.

표 1은 제작된 코일의 사양이다. 코일의 임계전류 값의 판단은 $1\mu\text{V}/\text{cm}$ 의 기준을 적용하여 측정하였다.

Table 1. Specifications of the pancake coils

항 목	코일 1	코일 2
권선 수	26 Turns	13 Turns
권선 길이	19.1m	8.9m
임계 전류	281A (77K)	292A (77K)
인덕턴스	$270\mu\text{H}$ (60Hz)	$74\mu\text{H}$ (60Hz)

그림 2는 4적층된 초전도 선재를 사용하여 26턴을 감은 팬케이크 코일이다. 적층된 선재는 내측, 외측지름이 각각 182mm , 280mm 이며 두께가 20mm 인 보빈에 권선을 하였다. 보빈의 재질은 G-10 FRP로 제작하였다. 그림 3은 전기적 방법을 이용하여 측정된 각 코일의 교류 손실 결과와 해석방법을 사용하여 코일의 교류손실을 계산한 결과이다. 코일 1의 경우 전송전류가 185A 흐를 경우 계산 값과 측정값은 각각 37.2W , 44W 이며, 40A 의 전송전류가 흐를 경우 0.7W 와 0.9W 였다. 적층선재 샘플을 이용한 계산결과와 전기적 방법을 사용하여 측정된 초전도 코일의 교류손실 값이 근접함을 알 수 있다. 이 현상은 코일 2에서도 나타난다.

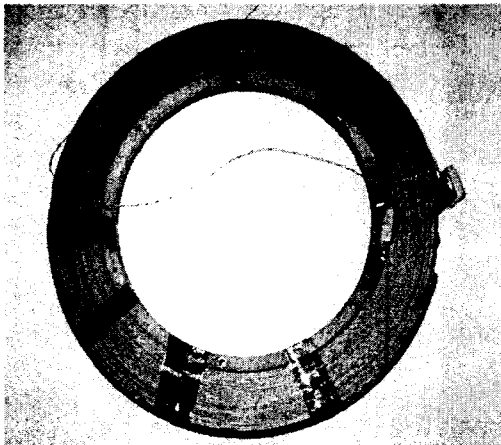
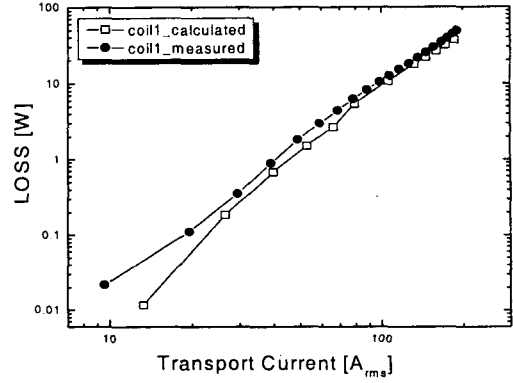
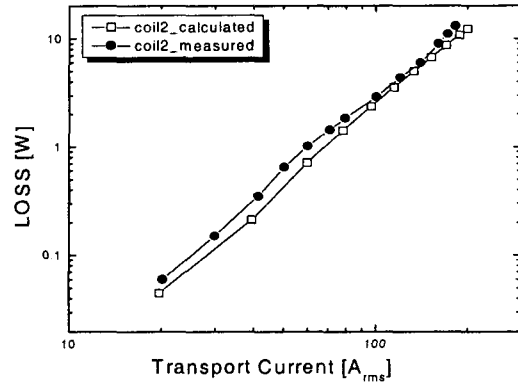


Fig. 2. Manufactured Pancake winding



(a) coil 1



(b) coil 2

Fig. 3. Measured and calculated AC loss of The pancake coils

4. 교류손실 측정

코일뿐만 아니라 철심을 가지는 형태에서도 앞에서 제시한 교류손실의 해석적 방법의 타당성을 확인하기 위하여 제작된 코일과 철심을 이용한 변압기 형태에서 코일에서 발생하는 교류손실을 각각 전기적 방법, 열량법, 전력계를 이용하여 교류 손실을 측정하였다.

제작된 코일 1을 고압으로 코일 2를 저압으로 사용하였다. 고압측과 저압측의 정격 전압, 전류는 각각 $60/30\text{Vrms}$, $100/200\text{Arms}$ 이며, 실험에 사용된 철심은 단면적이 82mm , 창의 가로 세로의 길이가 각각 166mm , 516mm 이며, 전체 크기가 $330\text{mm} \times 680\text{mm}$ 이다. 그림 4는 손실 측정에 사용된 코일 1과 코일 2를 보여주며, 철심을 통하여 자기적으로 연결되어있다. 손실을 측정하기 위한 전압 탭과 권선 주위의 자장 세기를 측정하기 위하여 홀 센서를 부착하였다. 손실을 측정하기 위한 전압 탭은 각 팬케이크 코일 끝단에 부착하였다. 전기적 방법을 사용한 교류손실 계산은 저압측을 단락 시키고 교류 손실을 측정하였다. 이때 저압측의 단락 저항과 전류도입선의 저항은 각각 $0.2\text{m}\Omega$, $0.9\text{m}\Omega$ 이다. 그림 4는 전기적 방법으로 측정된 교류손실 결과와 해석적 방법을 이용한 손실 결과를 보여준다.

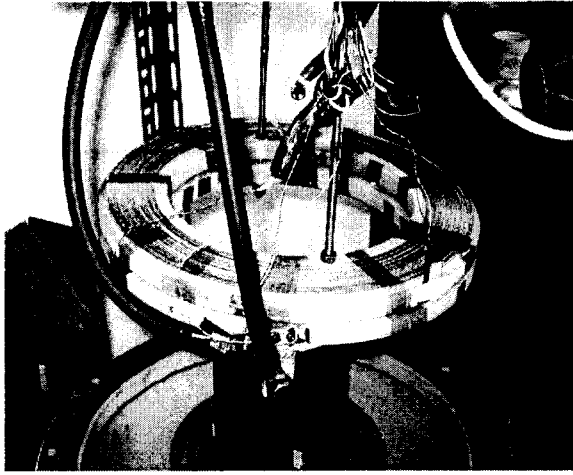


Fig. 4. Transformer winding configuration

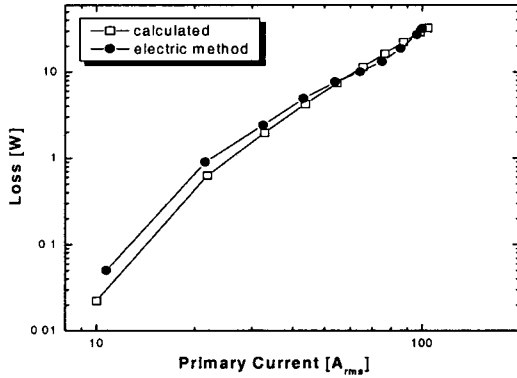


Fig. 5. The AC loss at secondary short circuit by electric method

고압측 코일에 흐르는 전류의 값이 85A 일 때 측정된 손실 값과 계산된 손실 값은 각각 18.7W, 21W이다.

열량법에 의한 교류 손실 실험은 전기적 방법에 의한 손실 값과 비교하기 위하여 저압측을 단락 시키고 초전도 변압기의 고압측에 전류를 인가하여 중공형 저온용기안의 시간당 액체질소 증발량을 측정하여 계산하였다.

저온용기의 시간당 증발량측정은 질소레벨메타를 이용하여 측정하였으며, 측정의 신뢰성을 위하여 같은 조건에서 수회 반복 실험하였다. 측정된 시간당 액체질소 증발량을 사용하여 저온용기의 손실은 다음 식을 사용하여 계산할 수 있다.

$$\text{손실 [W]} = \frac{\text{액체질소증발량 [l/h]}}{\alpha} \quad (1)$$

위 식에서 α 는 실험적 비례상수 값이다. 따라서 초전도 선재에서 발생하는 교류손실은 식(2)과 같다.

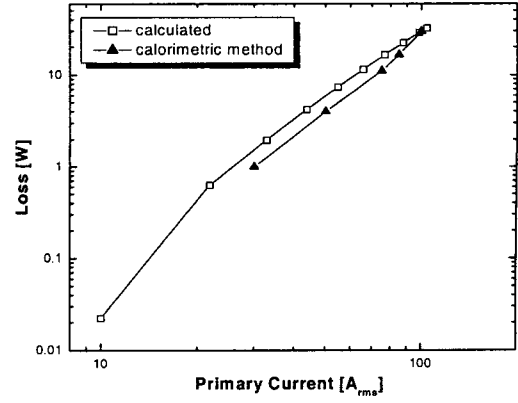


Fig. 6. The AC loss at secondary short circuit by calorimetric method

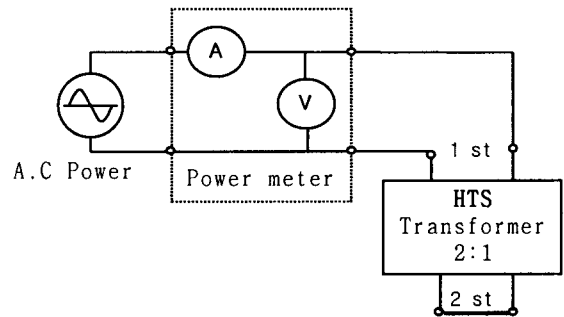


Fig. 7. Schematic of the measurement circuit by using wattmeter

$$Q_{loss} = Q_{total} - Q_{na} - Q_{cu_lead} \quad [W] \quad (2)$$

여기서 Q_{total} 는 초전도 권선에 전송 전류인가 시 발생하는 권선 전체손실이며, Q_{na} 는 저온용기에 의한 자연증발량, Q_{cu_lead} 는 전류도입 선에 의한 손실이다. 저온용기의 자연증발량은 주위온도에 따른 변화가 예상되므로 저온용기의 주위에 외부온도의 영향을 차단하여 저온용기 주위의 온도를 항상 일정하게 유지시킨 후 증발량을 측정하였다.

저온용기에서 발생하는 자연증발량은 0.6 l/h이며, 자연증발에 의한 손실 값은 28.8W로 측정되었다. 먼저 열량법을 이용한 손실 해석의 정확성을 확인하기 위하여 10W의 발열체를 사용하여 손실을 측정하였다. 측정 결과 10.31W로 정확한 손실 값을 측정하였다. 저압측을 단락한 상태에서 고압측 권선에 100A를 입력했을 때 초전도변압기의 권선 손실은 29.8W이며, 계산에 의한 손실 값은 31.3W이다. 열량법을 이용하여 팬케이크형 초전도 권선에서 발생한 손실은 그림 6과 같다.

그림 7은 전력계를 이용하여 교류손실을 측정하기 위한 회로도이다. 초전도 변압기의 저압측을 단락시키고 손실을 측정하였다.

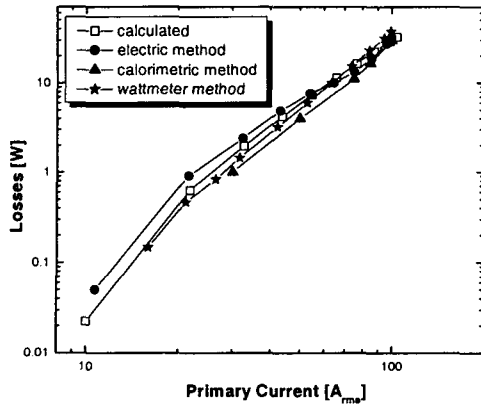


Fig. 8. AC losses of the HTS pancake coil

그림 8은 저압측을 단락 시키고 고압측에 전류를 인가하여 전기적 방법, 열량법, 전력계를 이용하여 팬케이크형태로 권선된 팬케이크형 초전도 코일에서의 교류손실 측정값과 해석적 방법을 이용하여 계산한 교류손실을 보여준다. 전체적으로 전기적 방법을 이용하여 측정한 교류손실 값이 해석 값과 근접함을 알 수 있다.

5. 결 론

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 자장의 방향을 고려하여 계산하였다. 계산방법의 신뢰성을 확인하기 위하여 해석에 사용한 초전도 팬케이크형 코일을 제작하고 전기적 방법을 사용하여 교류손실을 측정하여 수치적으로 계산한 방법과 비교하였으며, 변압기의 구조를 갖는 코일에서의 교류손실을 해석, 측정하여 비교하였다.

전기적 방법을 사용하여 측정한 손실 값은 전력계나 열량법을 사용하여 측정한 손실 값과 비교하였을 때 교류 손실 값의 차이가 작으므로 전기적 방법에 의한 교류손실 측정은 타당성이 있으며, 용량이 작은 초전도 코일의 교류손실 측정에 적합하다.

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 차세대초전도응용기술개발 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, NewYork, 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