

# 고온초전도 더블팬케이크 권선에서 발생하는 교류손실 측정

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

## AC Losses of the HTS Double Pancake Winding

Seung-Wook Lee, Hee-Joon Lee, Hyung-woo Lim, Guesoo Cha, Ji-Kwang Lee\*  
 Soonchunhyang University, Woosuk University\*

leeso23@sch.ac.kr

**Abstract** - AC loss which is generated in an HTS wire varies with the direction of the magnetic field. This paper calculated and measured the AC loss in the HTS double pancake windings.

Brandt equation is used to calculate the loss by perpendicular magnetic field. Calorimetric method is used to measure the AC loss. Results of calculated AC loss are compared with measured AC loss.

### 1. 서 론

전력기기에 사용되는 초전도 선재에는 교류전류와 교류자장이 인가되기 때문에 교류손실이 발생하고 교류자장에 의해 고온초전도선재의 임계전류가 감소한다. 이는 초전도 선재의 임계전류를 제한하게 된다. 또한 고온초전도선재를 사용한 전력기에서 발생하는 교류손실은 효율뿐만 아니라 고온초전도 권선의 안정화 한계를 저하시키기 때문에 중요하게 고려되어야 할 사항이다. 따라서 고온초전도 선재를 사용한 전력기기를 교류 환경에서 사용하기 위해서는 교류손실에 대한 해석이 필요하며 교류손실을 저감하기 위한 노력이 계속되어져 왔다.[1][2]

본 논문에서는 권선에서 발생하는 교류손실을 계산하기 위하여 수치해석을 이용하여 초전도 권선에서 발생하는 자장을 수평성분의 자장과 수직성분 자장으로 나누어 계산하였다. 수직방향 성분의 자장은 Brandt식을 이용하여 손실을 계산하였다. 계산된 교류 손실 값의 타당성을 확인하기 위하여 더블팬케이크 형태의 고온초전도 권선을 제작하고 저온용기에서의 액체질소 증발량을 이용한 열량법을 사용하여 교류손실을 측정하여, 계산된 손실 값과 측정된 손실 값을 비교하였다.

### 2. 해석 이론

고온초전도 선재에서의 교류손실은 자기장의 방향에 따라 크게 영향을 받게 되므로 선재에 가

해지는 자장의 방향을 고려하여 손실을 계산해야 한다. 초전도선에 가해지는 자장을 초전도선재의 좁은 면으로 가해지는 수평방향 자장과 선재의 넓은 면으로 가해지는 수직방향 자장으로 나누어서 교류손실을 계산한다.

그림 1은 초전도선재에 임의의 방향으로 가해지는 자장 B를 보여준다.

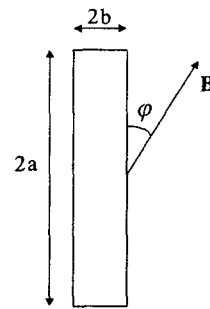


Fig. 1. HTS tape and the external magnetic field

수평방향 자장에 의해서 발생하는 단위길이 당의 손실은 완전침투가 발생하지 않는 경우와 완전침투가 발생하는 경우로 나누어 다음과 같이 구할 수 있다.

$$P_{||} = \frac{2fCA B_p^2}{3 \mu_0} \beta_{||}^3 \quad B < B_p \quad (1)$$

$$P_{||} = \frac{2fCA B_p^2}{\mu_0} \left( \beta_{||} - \frac{2}{3} \right) \quad B > B_p \quad (2)$$

위 식에서  $f$ 는 외부자장의 주파수,  $B_p$ 는 완전 침투 자속밀도,  $\beta_{||} = B/B_p$ ,  $CA$ 는 초전도선의 유효 단면적이다.

수직방향 자장에 의한 손실은 Brandt가 제안한 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$P_{\perp} = \frac{4\pi a^2 f}{\mu_0} B_c B \left[ \frac{2}{\beta_{\perp}} \ln(\cosh \beta_{\perp}) - \tanh \beta_{\perp} \right] \quad (3)$$

여기서  $B_c$ 는 임계자속밀도,  $\beta_{\perp} = B/B_c$ 이다.

임계전류 이하의 전송전류가 흐르는 경우 임의의 방향으로 가해지는 자장에 의해 권선에서 발생하는 교류손실은 다음과 같이 표현할 수 있다.[3][4]

$$P = P_{\parallel} \cos^2 \varphi + P_{\perp} \sin^2 \varphi \quad B < B_p \quad (4)$$

$$P = P_{\parallel} \cos \varphi + P_{\perp} \sin \varphi \quad B > B_p \quad (5)$$

위 식들로부터 초전도 권선에서 발생하는 교류손실은 다음과 같이 계산된다.

$$W = I \cdot P \quad [W] \quad (6)$$

여기서  $l$ 은 초전도 권선의 길이이며, 수직자장의 경우 점적율을 고려하여 계산한다.

### 3. 더블팬케이크형 권선 제작

손실 측정을 위해 더블팬케이크형 권선을 제작하였다. 제작된 더블팬케이크형 권선의 사양은 표 1과 같다. 더블팬케이크형 권선 두 개를 제작하였으며, 권선수는 44턴, 권선된 초전도 선재의 길이는 29.1m이다. 권선에 사용된 초전도선은 Bi-2223계열의 은으로 둘러싸여진 트위스트 되지 않은 필라멘트구조를 가지며, 단면적은 2.9mm×0.17mm, 임계전류는 77K에서 70A이다. 초전도 선재 권선 시 0.2mm의 절연물로 절연하여 권선 하였다.

Table 1. Specifications of the pancake windings

항 목	권선 1	권선 2
권선 수	44 Turns	
권선 길이	29.1 m	
권선 면적	8.8mm×7.8mm	
임계 전류	41 A	40 A

그림 2는 제작된 더블팬케이크형 권선이다. 권선의 내측과 외측 반지름은 각각 91mm, 141mm이며 보빈의 두께는 15mm이며, 재질은 G-10 FRP로 제작하였다.

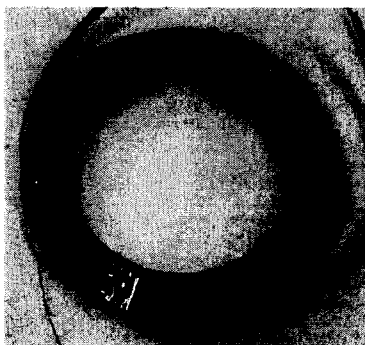


Fig. 2. Manufactured pancake winding

그림 3은 제작된 더블팬케이크 권선의 임계전류 측정 결과이다. 권선 1의 임계전류는 41A로 측정되었으며, 권선 2의 임계전류는 40A이다. 권선에 사용된 초전도 선재의 길이는 각각 29.1m이다. 권선의 임계전류 값의 판단은 1μV/cm의 기준을 적용하여 측정하였다.

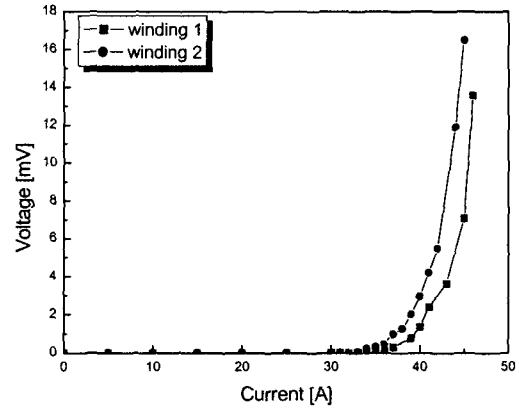


Fig. 3. Critical current of HTS tapes

### 4. 해석적 방법에 의한 손실 계산

제작된 더블팬케이크형 초전도 권선 손실을 계산하기 위하여 상용프로그램을 사용하여 권선에서 발생하는 자장을 이용하여 손실을 계산하였다. 해석에 사용한 철심의 폭은 82mm이고, 창 의 가로와 세로의 길이는 각각 166mm, 516mm이다. 철심의 전체 크기는 330mm×680mm이다.

권선 1에 교류 전류를 인가하고 권선 2에서 발생하는 유도되는 전류를 계산하였다. 더블팬케이크형 초전도 권선 1에 7.8A, 11A, 21A를 입력했을 때 권선 2에 흐르는 전류는 각각 7.7A, 10.9A, 20.8A였다.

그림 4 (a)는 해석영역에서 초전도 권선이 있는 위치를 확대한 그림이며, (b)는 권선의 자속 밀도 분포를 보여준다.

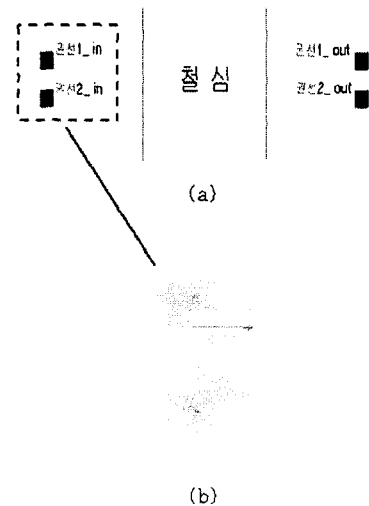


Fig. 4. Analysis model and the magnetic field distribution

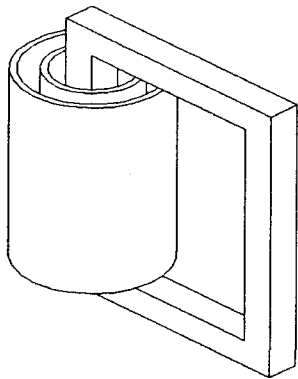
표 2는 고온초전도 권선에서 발생하는 손실 해석 결과를 나타내었다. 권선 1에 전류 7.8A 인가 시, 해석 식에 의한 초전도 선재의 교류손실은 0.29W로 계산되었으며, 11A, 21A가 흘렀을 경우 각각 0.93W, 6.9W로 계산되었다. 손실계산 시 자기장의 피크 값으로 계산하였으므로, 평균 자장 값으로 환산하여 계산하면 실제 초전도 권선에서 발생하는 교류손실은 각각 0.21W, 0.66W, 4.88W이다.

Table 2. Result of the AC loss measurement

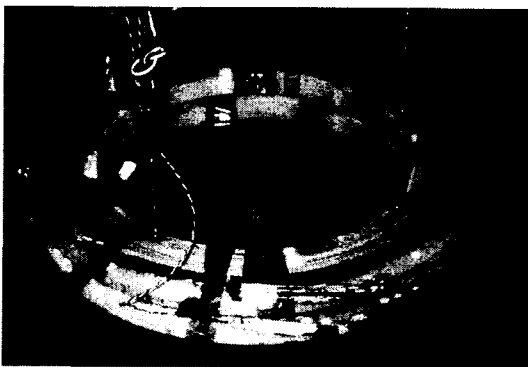
권선1 전류 [A]	권선2 전류 [A]	선재손실 [W]
7.8	7.7	0.21
11	10.9	0.66
21	20.8	4.88

### 5. 열량법에 의한 손실계산

열량법에 의한 손실 실험은 그림 5 (a)와 같이 중공형 저온용기안에 제작된 초전도 더블팬케이크 권선을 넣어 저온용기의 시간당 증발량을 측정하였다. (b)는 실험에 사용한 권선 1과 권선 2를 연결한 그림이다. 권선 2는 철심을 통하여 자기적으로 연결되어져 있다.



(a)



(b)

Fig. 5. Experimental apparatus and the HTS windings

저온용기의 증발량측정은 질소레벨메타를 이용하여 측정하였으며, 측정의 정확성을 위하여 같은 조건을 주어 수회 반복하여 실험하였다.

측정된 시간당 액체질소 증발량을 사용하여 저온용기의 손실은 다음 식을 사용하여 계산할 수 있다.

$$\text{손실}[W] = \frac{\text{액체질소증발량}[l/h]}{\alpha} \quad (7)$$

위 식에서  $\alpha$ 는 실험적 비례상수 값이다. 따라서 초전도 선재에서 발생하는 교류손실은 다음 식으로 계산되어진다.

$$Q_{\text{loss}} = Q_{\text{total}} - Q_{\text{natural}} - Q_{\text{currentlead}} [W] \quad (8)$$

여기서  $Q_{\text{total}}$ 는 초전도 권선에 전류인가 시 발생하는 전체손실이며,  $Q_{\text{natural}}$ 은 저온용기의 자연증발량,  $Q_{\text{currentlead}}$ 는 전류도입 선에 의한 손실이다. 초전도 권선에서 발생하는 손실을 알기 위해서 저온용기의 자연증발 손실 값을 측정하였다. 저온용기에서 발생하는 자연증발 손실 값은 17.5W로 측정되었으며, 권선 1에 7.8A, 11A, 21A를 입력했을 때 전류도입 선에 의한 손실은 각각 0.27W, 0.51W, 2.02W로 측정되었다.

권선 2에 흐르는 전류는 각각 6.9A, 9.2A, 19.2A로 측정되었으며, 저온용기에서 발생하는 시간당 증발량은 각각 0.407 l/h, 0.425 l/h, 0.52 l/h로 측정되었다.

표 3은 고온초전도 권선에서 발생하는 손실 실험 결과를 나타내었다. 인가전류 7.8A를 흘렀을 경우 초전도선재에서 발생하는 교류손실 값은 0.7W로 계산되었으며, 인가전류 11A, 21A를 흘려주었을 경우 초전도 선재에서 발생하는 교류손실은 각각 1.27W, 4.47W로 계산되었다.

Table 3. Result of the AC loss measurement

인가전류 [A]	시간당 증발량 [l/h]	전체손실 [W]	선재 손실 [W]
7.8	0.407	18.52	0.7
11	0.425	19.34	1.27
21	0.529	24.05	4.47

### 6. 결 론

고온초전도 선재를 사용한 전력기기에서 교류손실은 전력기기의 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 사

용한 초전도 더블팬케이크형 권선을 제작하고 열량법을 사용하여 초전도 권선에서 발생하는 손실을 측정하여 비교하였다.

초전도 권선에서 계산된 손실 값과 측정값의 차이는 각각 0.5W, 0.61W, 0.4W의 차이를 보인다. 이는 측정시의 오차로 생각된다. 실험결과 해석 식을 사용한 교류손실 계산은 타당성이 있다고 생각된다.

본 연구는 21세기프론티어 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] A. Wolfbrandt, N. Magnusson and S. Hornfeldt, "AC Losses in a BSCCO/Ag Tape Carrying AC Transport Current in AC Magnetic Fields Applied in Different Orientations," Applied Superconductivity Conference 2000, Virginia, USA, Sept., 2000
- [8] M. Wilson, Superconducting magnet, Clarendon Press, New York, 1983