

수직방향 자장에 의한 교류손실 계산

이승욱, 심정욱, 차귀수, 이지광*
 순천향대학교 전기공학과, 우석대학교 전기공학과*

Calculation of AC Losses by Perpendicular Magnetic Field

Seung-Wook Lee, Jungwook Sim, Gueeso Cha, Ji-Kwang Lee*
 Soonchunhyang University, Woosuk University*

leeso23@hanmail.net

Abstract - AC loss which is generated in an HTS wire varies with the direction of the external magnetic field. This paper calculates the AC loss in an HTS tape, where effects of the perpendicular direction of the magnetic field are considered. Brandt equation is used to calculate the loss by perpendicular magnetic field. In the calculation, current densities are varied along the variation of the magnitude of the external magnetic field. Results of calculation are compared with those of the conventional method.

1. 서 론

최근에 고온초전도선재를 사용한 전력용용 기기에 관한 관심이 높아지고 있으며, 장선화가 용이한 BSCCO선재가 주로 사용된다.

전력용용기기에 사용되는 고온초전도 선재에는 교류전류와 교류자장이 인가되기 때문에 교류손실이 발생하며, 교류손실의 주된 원인은 이송전류에 의한 자기자계손실과 외부자장에 의한 자화손실 및 결합손실이다.

고온초전도선에 교류자장이 인가되면 이 자장에 의하여 초전도선의 임계전류가 감소하게 되며 이는 초전도선에 흐르는 임계전류를 제한하므로 고온초전도선을 사용한 전력용용기기를 설계함에 있어서 중요한 변수가 된다. 따라서 고온초전도체를 사용한 전력용용기기의 설계에서 외부자장의 방향을 고려한 교류손실을 저감하기 위한 노력이 계속되어 왔다.[1][2]

외부자장에는 초전도선에 수평성분으로 가해지는 자장과 수직성분으로 가해지는 자장이 있으며 수직성분 자장에 의한 교류손실이 수평성분 자장 손실보다 훨씬 크다.

그러므로 초전도선에 수직으로 인가되는 자장에 의한 손실을 계산하는 것이 매우 중요하며, 수직 방향을 고려한 교류손실을 정확하게 계산하

기 위하여 Brandt, Carr, Magnusson등에 의해서 많은 연구가 진행되어 왔다.[3]-[5]

본 논문에서는 Brandt식을 이용하여 수직방향 자장에 의한 손실을 계산했다. Brandt식에서는 임계전류가 일정한 것으로 했으나 여기서는 외부자장의 변화에 따라서 임계전류를 변화시켜서 보다 계산의 정밀도를 높였다.

2. 해석 이론

교류손실은 자장 B , 이송전류 I , 온도 T 와 주파수 f 에 의하여 좌우된다. 고온초전도선에 외부 교류자장이 가해지게 되면 이 자장은 초전도선의 임계전류를 감소시키는데 임계전류의 감소량은 외부자장의 방향에 크게 영향을 받는다.

즉 초전도선에 가해지는 자장을 선의 좁은 면으로 가해지는 수평방향의 자장과 선의 넓은 면으로 가해지는 수직방향의 자장으로 나누어서 교류손실을 계산한다.

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

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

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

위 식에서 f 는 외부자장의 주파수, B_p 는 완전 침투 자속밀도, $\beta_{//} = B_{//} / B_p$, CA 는 초전도선의 유효단면적이다.

수직방향 자장에 의한 손실은 수평자장 자장에 의한 손실을 계산하는 식을 수직방향 자장의 경우에 그대로 적용시키면 다음과 같이 구할 수 있다.

$$P_{\perp} = \frac{2fCAB_p^2}{3\mu_0} \beta_{\perp}^3 \quad B < B_p \quad (3)$$

$$P_{\perp} = \frac{2fCAB_p^2}{\mu_0} \left(\beta_{\perp} - \frac{2}{3}\right) \quad B \gg B_p \quad (4)$$

위 식에서 $\beta_{\perp} = B_{\perp}/B_p$ 이다. 이 경우에 임의의 방향으로 가해지는 자장에 의한 손실은 다음과 같이 구했다.

$$P = P_{\parallel} + P_{\perp} \quad (5)$$

수직방향에 의한 손실은 다음과 같이도 구할 수 있다.

$$P_{\perp} = K \frac{4\pi a^2 f}{\mu_0} B_c B \left[\frac{2}{\beta_{\perp}} \ln(\cosh \beta_{\perp}) - \tanh \beta_{\perp} \right] \quad (6)$$

$2a$ 는 초전도선의 폭이며, B_c 는 임계 침투 자속밀도, $\beta_{\perp} = B_{\perp}/B_c$, K 는 형상 계수이다.

이들로부터 임의의 방향으로 가해지는 자장에 의한 교류손실 식은 다음과 같이 표현할 수 있다. [4]

$$P = P_{\parallel} \cos^n \varphi + P_{\perp} \sin^n \varphi \quad (7)$$

n 은 상수값으로 실험적으로 측정된 결과에 의하면 외부자장이 증가하면 2로 수렴한다.

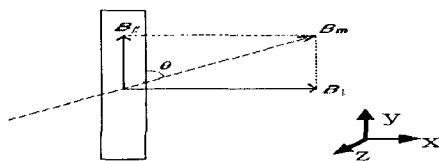
3. 계산 사례

임의의 방향으로 가해지는 자장에 의한 교류손실을 계산하기 위해서 사용한 초전도선은 Bi-2223계열의 은으로 둘러싸여진 트위스트되지 않은 필라멘트구조를 가지며, 단면적은 $3.1\text{mm} \times 0.168\text{mm}$, 임계전류는 77K에서 81A이다.

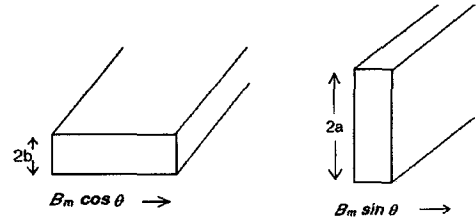
표 1. 고온초전도 선재의 사양

재질	BSCCO-2223	모재	Ag 합금
테이프 폭	3.1 mm	테이프 두께	0.168 mm
트위스트	NO	임계전류 (77K)	81 A

그림 1과 같이 초전도선에 인가되는 외부자장의 세기를 B_m 이라고 할 때에 수직성분의 외부자장은 $B_{\perp} = B_m \cos \theta$ 이고 수평성분의 외부자장은 $B_{\parallel} = B_m \sin \theta$ 이다.



(a) 임의의 방향으로 가해지는 자장



(b) 수평 자장 (c) 수직 자장

그림 1. 고온 초전도 테이프에 인가되는 외부자장
Fig. 1 External magnetic field applied to an HTS tape

3.1 기존의 손실식을 이용한 계산 결과

외부자장의 각도 θ 에 따라 변화하는 수직·수평 임계전류 밀도를 식(7)을 이용해서 계산했다.

$$J_c = J_{c0} \frac{B_0}{B + B_0} \quad (8)$$

식(1) - 식(4)를 이용해서 교류손실을 계산한 결과는 다음과 같다.

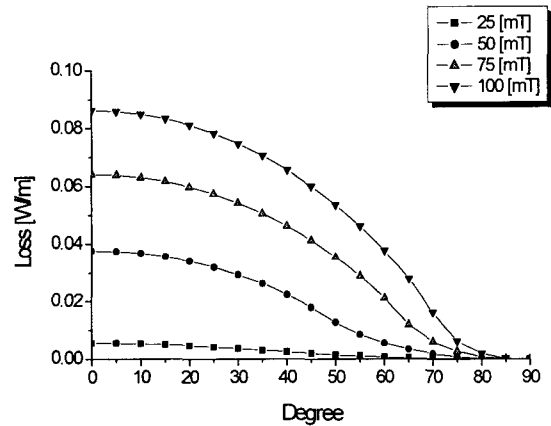


그림 2. 기존의 식을 이용한 수평방향 손실
Fig. 2. Parallel magnetic field losses by conventional method.

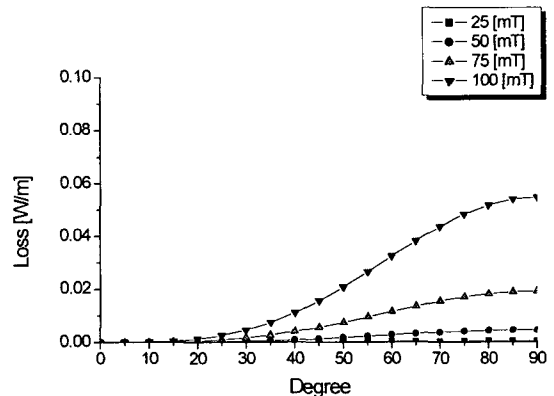


그림 3. 기존의 식을 이용한 수직방향 손실
Fig. 3. Perpendicular magnetic field losses by conventional method.

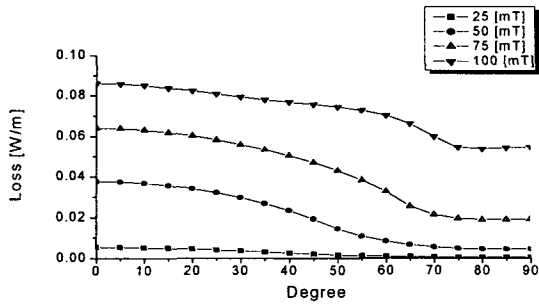


그림 4. 기존의 식을 이용한 외부자장 손실
Fig. 4. Total losses by conventional method.

그림 2와 그림 3을 비교해 보면 수직방향에서의 손실이 수평방향에서의 손실에 비해서 적은 것을 알 수 있고 이 결과는 수직방향에 의한 교류손실이 수평방향에 의한 교류손실보다 크다는 측정결과와 일치하지 않는다. 이에 따라서 수평방향의 자장에 의해서 발생하는 손실을 계산하는데 사용되어 왔던 기존의 교류손실 계산식을 수직방향의 자장에 의해서 발생하는 교류손실 계산까지 확장하는 것을 불가능하다는 결론을 얻을 수 있다.

3.2 임계전류변화를 고려하지 않으면서 Brandt 식을 이용한 계산 결과

기존의 식을 사용하는 대신 자기자계에서의 임계전류밀도 J_c 를 구하여 Brandt식을 사용하여 외부자장의 각도 θ 에 따라 변화하는 수직·수평 임계전류 밀도를 계산하였다.

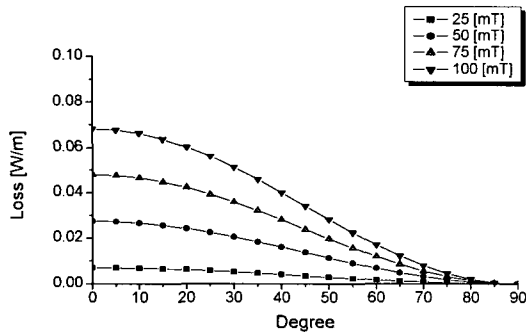


그림 5. Brandt식을 이용한 수평방향손실, J_c 고정
Fig. 5. Parallel magnetic field losses by Brandt equation, fixed J_c .

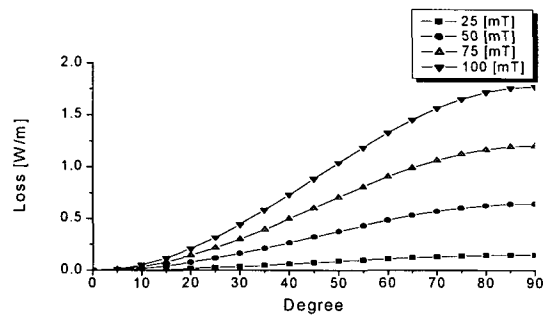


그림 6. Brandt식을 이용한 수직방향손실, J_c 고정
Fig. 6. Perpendicular magnetic field losses by Brandt equation, fixed J_c .

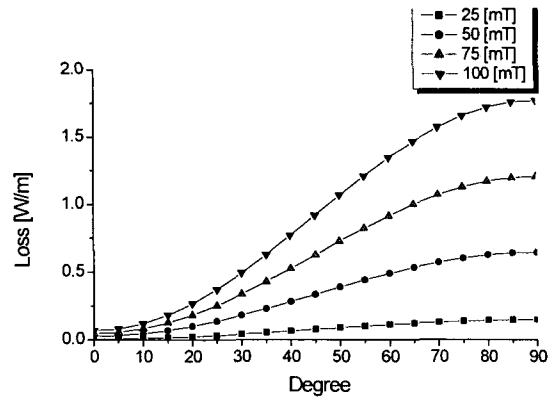


그림 7. Brandt식을 이용한 외부자장손실, J_c 고정
Fig. 7. Total losses by Brandt equation, fixed J_c .

그림 5과 그림 6에서 각도가 증가함에 따라 수평방향의 자장에 의한 손실은 감소하고 수직방향의 자장에 의한 손실은 증가하는 경향은 그림 2와 그림 3과 같다. 그러나 그림 5와 그림 6에서는 수직방향의 자장에 의한 손실이 수평방향의 자장에 의한 손실보다 20배 이상 큰 것을 알 수 있고, 그림 7에서 전체 손실도 거의 수직방향의 손실에 의해서 좌우되는 것을 볼 수 있다.

3.3 임계전류변화를 고려하면서 Brandt 식을 이용한 계산 결과

Brandt 식을 이용하여 교류손실을 계산하면서 J_c 가 외부자장에 의해서 변하는 것을 고려한 결과는 다음과 같다.

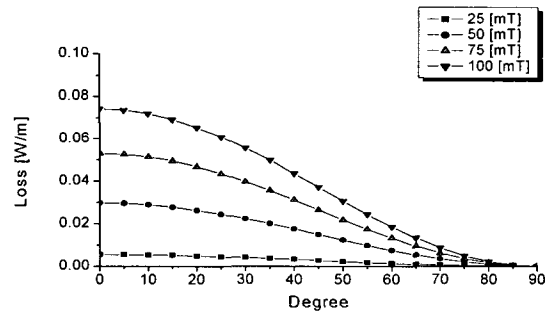


그림 8. Brandt식을 이용한 수평방향손실, J_c 변화
Fig. 8. Parallel magnetic field losses by Brandt equation, variable J_c .

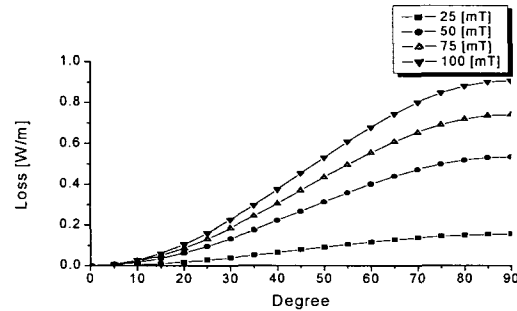


그림 9. Brandt식을 이용한 수직방향손실, J_c 변화
Fig. 9. Perpendicular magnetic field losses by Brandt equation, variable J_c .

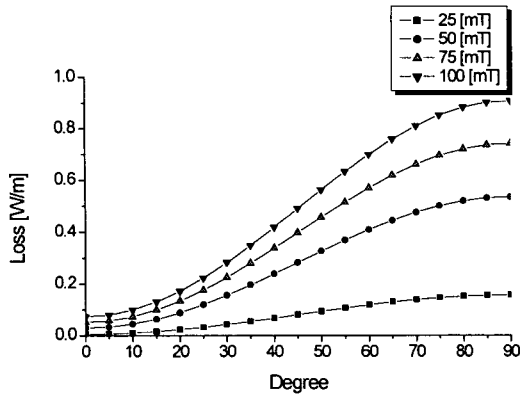


그림 10. Brandt식을 이용한 외부자장 손실
Fig. 10. Total losses by Brandt equation, variable J_c .

그림 7과 그림 10을 비교해 보면 외부자장에 따라서 임계전류의 변화를 고려한 경우의 손실이 고려하지 않은 경우의 손실보다 절반 정도로 감소하는 것을 볼 수 있고, 임계전류의 변화를 고려해서 손실을 계산한 결과가 손실을 측정된 결과와 보다 근접한다.[6]

4. 결 론

외부 자장의 방향을 고려한 교류손실의 계산은 기존의 손실계산식을 사용하여 계산된 수평방향 손실과 수직방향 손실을 비교하여 보면 수평방향 손실이 크다. 이 결과를 실험에 의하여 구한 교류 손실값과 비교하여 보면 수평방향 자장에 의한 손실값의 계산은 맞으나 수직방향 자장에 의한 손실값은 많은 차이를 보이므로 기존의 식을 사용하여 수직방향 손실을 정확하게 계산되지 못함을 알 수 있다.

수직방향 자장에 의한 손실을 Brandt식을 사용하여 계산한 값은 실험치와 거의 같은 패턴을 유지함을 알 수 있으며, 외부자장의 크기에 따라 변화하는 임계 전류밀도를 고려하면 실험에 의해 측정된 손실 값과 계산에 의한 손실값이 보다 근접함을 알 수 있었다.

외부자장에 의한 교류손실을 더욱 정확하게 계산하기 위해서는 계산에 사용되는 상수값들을 정확하게 선정하는 것이 필요하다.

(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] 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.
- [4] W.J. Carr, AC Loss and macroscopic theory of superconductors, Gordon and Breach Science Publishers, NewYork, 1983.
- [5] 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.
- [6] 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
- [7] M. Wilson, Superconducting magnet, Clarendon Press, New York, 1983