

고온초전도체의 자기자계손실 측정

심정욱, 차귀수, 이지광, 한승엽
 순천향대학교 전기공학과, 우석대학교 전기공학과, 서울대학교 전기공학부

Measurement of the Self-field Loss in the HTS Tape

Jung-Wook Sim, Guee-Soo Cha, Ji-Kwang Lee, Song-Yop Hahn
 Soonchunhyang University, Woosuk University, Seoul National University

Abstract - Transport current is the HTS tape generates the self field loss. To measure the self field loss, rectangular voltage tap has been used. In this paper, self field loss was measured using the spiral voltage tap method. Result of the measurement was compared with that of the theoretical

그림 1과 같이 테이프선재의 주변에 원통을 배치하고 이 원통표면에 나선형으로 전압리드를 배치한다. 그림 2는 나선형 권선법에 의한 측정의 원리이다. 그림에서 곡선 AA'A'', BB'B''는 반경 r_A, r_B의 원통표면 상의 나선형곡선으로서 각각의 원통 축은 테이프선재의 축 CC'과 동일하다. 또 l₀는 전압단자 사이의 거리이다. 곡선 BB'B''는 선재의 중심축에서 곡선 AA'A''를 S_B 상에 투영한 것이다.

1. 서 론

초전도체에 발생하는 교류손실은 교류자장이 인가될 때 발생하는 자화손실과 통전전류에 의해서 발생하는 자기자계손실로 나눌 수 있다. 초전도체 자석을 만드는 경우와 같이 강자장이 인가되는 경우에는 자화손실이 커서 자기자계 손실은 무시할 수 있는 정도이다. 그러나 초전도변압기나 초전도케이블과 같이 초전도에 인가되는 자장의 세기가 비교적 약할 경우에는 자기자계손실도 자화손실에 비해서 무시할 수 없는 수준이다. 본 연구에서는 고온초전도테이프에 전류가 흐를 때에 발생하는 손실을 측정하였다.

자기자계에 의한 교류손실을 4단자방법으로 측정하는 경우에 전류와 전압을 측정해서 전류와 전압을 적분해서 순시전력을 구하고 이를 1주기 T초동안 적분해서 단위 시간당의 평균손실을 구한다.

전압은 자화에 따라서 발생하는 자계의 시간변화를 이용해서 측정하기 때문에, 이 전압을 측정하기 위해서 설치하는 구형코일의 배치장소, 루프의 크기에 따라서 측정결과가 달라진다.

무한대의 크기를 갖는 구형코일을 설치하면 측정하면 자계의 이방성의 영향을 제거할 수가 있기 때문에 정확한 값을 얻을 수 있다. 그러나 제한된 공간 내에서 손실을 측정해야하는 경우와 측정대상 선재 이외의 선재에서 발생하는 자계를 제거할 수 없는 경우 등은 구형코일에 의한 측정법을 사용하기가 어렵다. 여기서는 나선형 권선법을 이용해서 측정했다.

2. 나선형 권선법에 의한 자기자계손실 측정

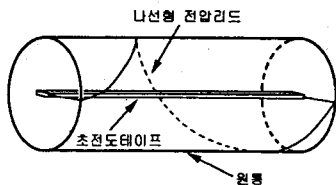


그림 1 원통 위에 배치된 나선형 전압리드

나선형권선법을 이용해서 손실을 측정하기 위해서는

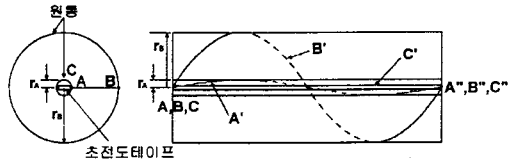


그림 2 나선형 전압리드루프를 이용한 손실 측정

반경 r_B가 테이프 폭 d보다 충분히 크면 원통 표면에서의 자계의 세기가 일정하다고 볼 수 있으므로 원통표면 상에 초전도 테이프의 전압단자 사이에서 소비되는 교류통전손실을 나선형 권선에서 측정된 전압을 이용해서 표시하면 다음 식과 같다.

$$P_B = \frac{1}{T} \int_0^T i(t)v_B(t)dt \quad (1)$$

$$v_B(t) = \oint_{CC'B'B''} E(t)dl \quad (2)$$

위 식에서 v_B는 반경이 r_B인 원통 표면 S_B의 나선형전압리드에서 측정된 전압, i(t)는 정현파 교류전류, E(t)는 나선형 전압단자 사이에서 자기전류에 의해서 발생하는 전계의 세기, T는 교류전류의 주기이다. P_B는 구형전압단자의 길이 r₀을 충분히 크게 한 경우에 구형전압 루프에서 측정된 교류통전손실치와 같게 되는 것을 알 수 있다. 또 반경이 r_A인 원통 표면 S_A에 부착된 나선형 전압리드에서 소비되는 통전손실은 나선형 전압리드 CC'C'', A''A'A'에 유기되는 전압으로부터 식 (3)과 같이 계산된다.

$$P_A = \frac{1}{T} \int_0^T i(t)v_A(t)dt \quad (3)$$

$$v_A(t) = \oint_{CC'A'A''} E(t)dl \quad (4)$$

반경이 r_B와 r_A인 원통 표면 S_B와 S_A에 위치한 나선형 리드에 발생하는 전압 v_B와 v_A는 자속의 변화로 구할 수 있다.

$$v_B(t) = -\frac{d\phi_B}{dt} \quad (5)$$

$$v_A(t) = -\frac{d\phi_A}{dt} \quad (6)$$

ϕ_B 와 ϕ_A 는 루프 CC'C'B'B'B, CC'C'A'A'A에 각각 채교하는 자속이다. 원통의 표면에서 테이프소재의 반경방향 성분의 자속과 축방향 자속은 없기 때문에 ϕ_B 와 ϕ_A 는 다음과 같다.

$$\phi_B = \int_0^{2\pi} \left[\int_0^{r_B} B_\theta(r, \theta) dr \right] \frac{l_v}{2\pi} d\theta \quad (7)$$

$$\phi_A = \int_0^{2\pi} \left[\int_0^{r_A} B_\theta(r, \theta) dr \right] \frac{l_v}{2\pi} d\theta \quad (8)$$

이들로부터 두 나선형 리드 사이를 통과하는 자속은 다음과 같다.

$$\phi_B - \phi_A = \int_{r_A}^{r_B} \left[\int_0^{2\pi} B_\theta(r, \theta) \frac{l_v}{2\pi} d\theta \right] dr \quad (9)$$

Ampere법칙을 이용해서 정리하면

$$\phi_B - \phi_A = i(t) \int_{r_A}^{r_B} \frac{\mu_0}{r} \frac{l_v}{2\pi} dr = \mu_0 i(t) \frac{l_v}{2\pi} \ln\left(\frac{r_B}{r_A}\right) \quad (10)$$

식 (3), (4), (6)으로부터

$$P_A = \frac{1}{T} \int_0^T \left(\mu_0 \frac{di(t)}{dt} \frac{l_v}{2\pi} \ln\left(\frac{r_B}{r_A}\right) - \frac{d\phi_B}{dt} \right) dt \quad (11)$$

가 된다.

위 식에서 전류 $i(t)$ 는 외부에서 흘리는 전류로 정현파이므로 이를 미분해도 역시 정현파이다. 이를 고려하면 식 (11)에서 $i(t)$ 를 미분해서 한 주기 동안 적분한 첫 항은 0이 된다. 따라서

$$P_A = P_B \quad (12)$$

가 되어 측정된 손실은 나선형 리드의 반경에 영향을 받지 않는 일정한 값이 되는 것을 알 수 있다.

3. 측 정

표 2.1은 측정에 사용된 고온초전도 BSCCO2223테이프의 사양으로, 전체길이가 10cm이고 pick-up 코일이 부착된 길이는 5cm이다. 테이프의 폭과 두께는 각각 3.5mm, 0.23mm이고 61개의 필라멘트로 구성된 다심선재이다.

표 2.1 초전도테이프의 사양

재질	BSCCO2223	필라멘트 수	61
테이프 폭	3.5mm	필라멘트 폭	0.015mm
테이프 두께	0.23mm	은 비율	2.66
필라멘트 영역 폭	2.84mm	필라멘트 영역 두께	0.187mm
트위스트 피치	no twist	필라멘트영역의 은 비율	0.71

측정회로의 구성은 그림 3과 같다. 그림에서 초전도테이프에 원통을 설치하고 pick-up코일을 나선형으로 배치했다.

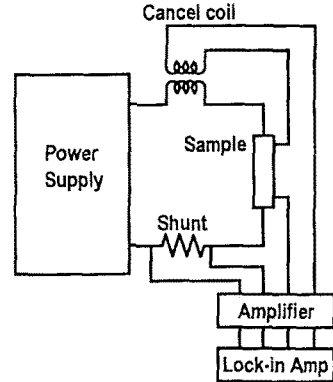


그림 3. 측정회로 구성

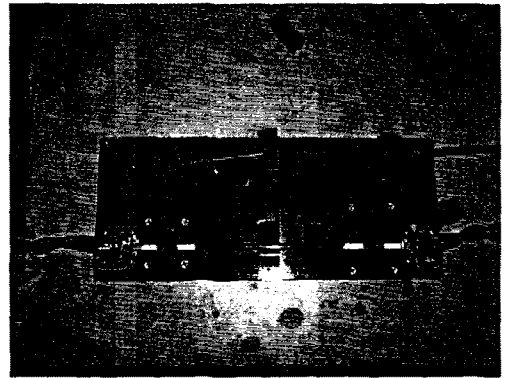


그림 4. 나선형 전압리드

나선형 리드에는 초전도 테이프에 발생하는 저항에 의한 전압성분과 교류자장에 의해서 발생하는 유도전압 성분이 존재한다. 이 중에서 손실을 발생시키는 전압성분은 저항에 의한 것 뿐이므로 나선형 리드에서 발생한 유도전압성분은 cancel 코일을 이용해서 대부분 제거한다. 제거되지 않은 유도성 전압성분은 Lock-in 증폭기를 이용해서 나선형 리드에 발생하는 전압 중에서 초전도선재에 흐르는 전류와 위상이 전압의 크기 만큼 측정함으로써 배제할 수 있다.

이와 같은 방법으로 측정된 자기자계 손실은 아래와 같은 Norris식으로 계산된 값과 비교했다.

$$Q = \frac{I_c^2 \mu_0}{\pi} \left\{ \left(1 - \frac{i_b}{I_c}\right) \ln\left(1 - \frac{i_b}{I_c}\right) + \left(2 - \frac{i_b}{I_c}\right) \frac{i_b}{2I_c} \right\} [J/m/cycle] \quad (13)$$

위 식에서 i_b 는 통전전류의 최대치이고 I_c 는 초전도 테이프의 임계전류로서 40 A이다.

그림 4는 전류를 35A까지 증가시키면서 60Hz와 120Hz에 대해서 자기자계손실을 측정한 결과이다. 120Hz일 때의 손실은 60Hz일 때의 손실과 큰 차이는 없으나 전류가 적은 영역에서는 주파수가 120Hz일 때가 약간 작은 것으로 측정되었다.

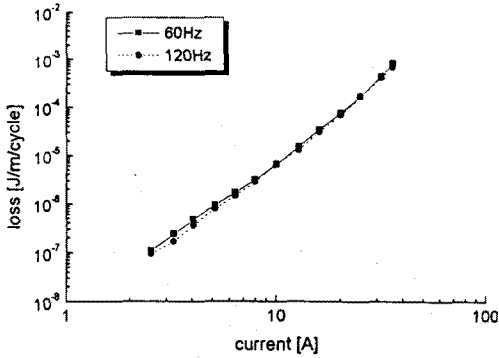


그림 4. 60Hz와 120Hz에서의 자화손실

그림 5는 인가주파수가 60Hz일 때에 Norris식으로 계산한 손실과 측정된 손실을 비교한 것으로 두 값이 비교적 잘 일치함을 볼 수 있다. 측정에 사용된 초전도체이프의 임계전류는 40A이기 때문에 이 값을 넘으면 이론적으로는 손실을 계산하는 것이 불가능하다. 그림에 표시된 전류는 실효치 전류로서 31A와 35A의 두 점은 실험치만 제시되어 있다. 임계전류를 넘으면 자기자계손실이 임계전류이내일 때에 비해서 보다 많이 증가하는 것을 볼 수 있다.

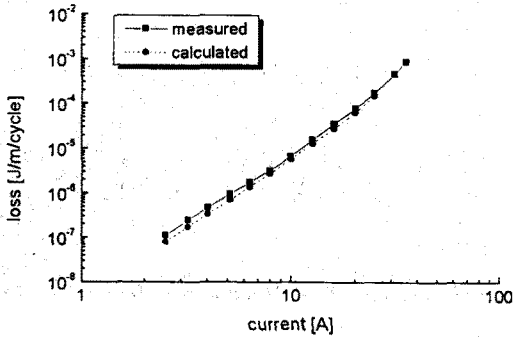


그림 5. 측정값과 이론값의 비교, 60Hz

그림 6은 인가주파수가 120Hz일 때에 측정값과 이론값을 비교한 것으로서 이 경우에도 측정값과 이론값이 거의 같은 것을 볼 수 있다. 전류에 따른 손실 변화의 경향도 인가주파수가 60Hz일 때와 비슷하다.

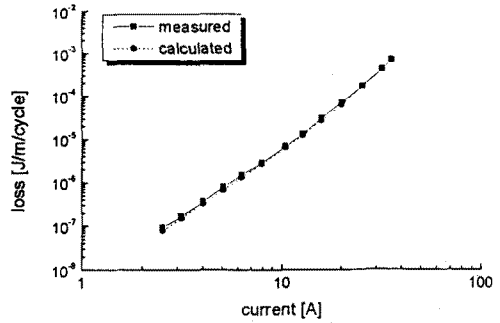


그림 6 측정값과 이론값의 비교, 120Hz

4. 결 론

본 연구에서는 나선형 전압리드를 이용해서 고온초전도체이프에서 통전전류에 의해서 발생한 교류손실을 측정했다. 손실측정값을 이론적인 계산값과 비교한 결과 두 값이 잘 맞음을 확인할 수 있었다. 주파수에 따른 손실값은 큰 차이는 없으나 주파수가 높아지면 손실이 약간 감소함을 알 수 있었다. 본 연구에서 얻은 결과는 초전도체이프에 인가되는 자장의 세기가 약한 초전도전력 기기에서의 손실산정에 활용될 수 있다.

본 논문은 산업자원부의 지원으로 수행되었습니다.

(참 고 문 헌)

- [1] W.T.Norris, "Calculation of Hysteresis Losses in Hard Superconductors carrying AC," Jour. of Physics, vol.3, pp.489-507, 1970
- [2] J.R.Clem, T.Pe and J.McDonald, "Voltage Probe Dependence and Magnetic Flux Contribution to the Measured Voltage in AC Transport Measurements," Springer LNP, vol.475, pp.253-264, 1996
- [3] S.Fuku, et. al., "Transport Current AC Losses of High Tc Superconduction Tapes Exposed to AC Magnetic Field," Cryogenic Engineering Conference, Portland, USA, 1997
- [4] 심정옥 등, "고온초전도선재의 자화손실 측정," 대한전기학회 논문지, 제48권, 제4호, pp182-186, 1999