

열량법을 이용한 소용량급 고온초전도 마그넷의 교류손실 측정

박세웅, 장대희, 강형구*, 배덕권, 김태중**, 윤용수***, 고태국

연세대학교 전기전자공학과, *현대중공업 기계전기연구소, **성남기능대학 자동화 시스템과, ***안산공과대학 전기과

Experimental Set-up for AC Loss in Small Scale HTS Manget by using Calorimetric Method

Seiwoong Park, Dae Hee Jang, Hyoungku Kang, Duck Kweon Bae, Tae Jung Kim,
Yong Soo Yoon, Tae Kuk Ko

Dept. of Electrical and Electronic Engineering, Yonsei University,
•Electro-Mechanical Research Institute, Hyundai Heavy Industries Co., LTD.,
**Dept. of Factory Automation, Seongnam Polytechnic College,
***Dept. of Electrical Engineering, Ansan College of Technology

Abstract - Generally, the high Tc superconductor (HTS) doesn't generate any loss in DC condition, but generate considerable loss in AC condition. Until now AC loss in superconductor has been researched on measuring method of short sample by using electrical method and magnetization method. But it is not easy to estimate AC loss in high class magnet system with results of measuring AC loss in short sample. In this paper, we carry out research on measuring method by using calorimetric method used in measuring AC loss in high class magnet system. We make the inductive and non-inductive superconducting magnet and measure the generated AC loss, then we compare the measured results with the calculated results using Norris equation. This measuring method of AC loss using calorimetric method can measure not only AC loss in superconducting magnet but losses in conducting, radiant and low temperature. Consequently it is thought that efficient design and fabrication of superconducting magnet system will be possible by means of AC loss measurement method using calorimetric method.

1. 서 론

최근 고온초전도 선재를 이용한 전력기기의 개발에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 고온초전도 선재를 이용한 전력기는 저손실, 고효율, 경량화, 환경친화적 등의 장점을 가지고 있지만 대부분이 교류환경에서 유행되거나 때문에 초전도 선재에서 교류손실이 발생하게 된다. 초전도 선재에서 발생하는 교류손실은 전력기기의 효율뿐만 아니라 전력기기 시스템의 냉각효율을 저하시키는 요인이 된다. 현재까지 국내에서 이루어진 교류손실에 관한 연구는 주로 단척시료에 대한 자화손실 또는 통전손실에 대한 측정을 중심으로 이루어져왔다. 초전도모터, 초전도변압기, 그리고 초전도한류기 등의 초전도 전력기기의 상용화가 임박한 상황에서 이와 같은 초전도 마그넷시스템의 교류손실 측정과 계산에 관한 연구가 반드시 수행되어야 할 것이다. 여러 가지 초전도 전력기기 중에서도 초전도한류기는 가장 상용화가 빨리 이뤄질 것으로 평가받고 있다. 현재 국내에서는 21세기 프론티어 사업의 일환으로 연세대학교와 현대중공업에서 공동으로 무유도 권선형 초전도한류기가 연구, 개발되고 있다.

본 논문에서는 21세기 프론티어 사업으로 개발되고 있는 무유도 권선형 한류기의 성공적인 개발을 위한 핵심 기초기반 기술인 초전도 마그넷의 교류손실 측정에 관한

연구를 수행하였다.

2. 교류손실 측정법

2.1 교류손실 측정법의 종류

일반적으로 초전도선재는 직류환경에서 '0' 저항성에 의해 손실이 발생하지 않지만 교류환경에서는 여러 가지 요인에 의해 손실이 발생하게 된다. 교류손실은 크게 초전도선재 내부의 통전손실과 외부의 자계에 의해 발생되는 자화손실로 구분할 수 있다. 교류손실을 측정하기 위한 방법으로는 주로 초전도 선재에 흐르는 전류와 양단의 전압을 측정하여 손실을 측정하는 통전법, 외부자계 변화에 의한 자화량을 측정하여 자화손실을 측정하는 자화법, 그리고 교류손실에 의해 기화되는 냉매의 가스량, 냉매의 액면 저하 및 온도변화를 측정하여 교류손실을 측정하는 열량법의 3가지가 사용되고 있다. 현재까지 초전도선재의 교류손실은 주로 단척선재를 이용한 통전법과 자화법을 중심으로 하는 연구가 이루어져 왔다. 이러한 단척선재에서의 교류손실에 관한 연구는 초전도 마그넷을 설계, 제작할 때 가장 기본이 되는 요소가 된다. 그러나 실제 시스템 용용적인 측면에서의 교류손실은 단척선재에서의 교류손실 발생 메커니즘과 일치하지 않는 부분이 존재하기 때문에 대용량급의 초전도 전력기기 시스템을 설계, 제작하기 위해서는 통전법과 자화법과 같은 측정방법 외에 열량법과 같은 측정법을 이용하는 것이 필요할 것이다.

2.2 교류손실 측정법의 특징

대용량급 초전도 마그넷의 교류손실을 측정하기 위해서는 열량법을 이용한 방법이 가장 적합하다고 알려져 있다. 그러나 열량법을 이용한 교류손실 측정법은 통전법과 자화법과 같은 측정법에 비해 측정을 위한 시간이 다소 오래 걸리고 측정오차가 크다는 단점이 있다. 이에 반해서 통전법과 자화법을 이용한 교류손실 측정은 장비가 간단하고 측정시간이 짧으며 측정값이 비교적 정확하다는 장점 등을 가지고 있으나 대용량급 시스템의 교류손실 측정에는 부적합하다. 국내에서는 현재까지 단척선재에 대한 교류손실을 중심으로 하는 연구가 이루어졌으며, 열량법을 이용한 대용량 초전도 마그넷 시스템의 교류손실에 대한 연구는 아직 미미한 실정이다. 그러나 대용량급 초전도 마그넷 시스템의 상용화를 위해서는 열량

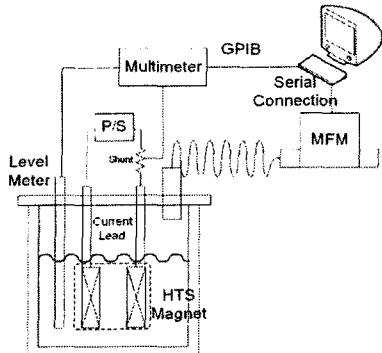


그림 1. MFM을 이용한 교류손실 측정 실험구성도

법을 이용한 교류손실의 측정과 연구가 반드시 필요하다.

3. 열량법을 이용한 교류손실의 측정

3.1 실험구성

고온초전도 마그넷에서 발생하는 교류손실을 열량법으로 측정하기 위해 위 그림 1과 같은 시스템을 구성하였다. 본 연구에서는 BSCCO-2223 선재를 이용해 무유도 솔레노이드형 마그넷을 제작한 후, 통전전류의 크기를 단계적으로 변화시키면서 교류손실에 의해 기화되는 액체질소의 양을 Mass Flow Meter(MFM)를 이용하여 측정하였다. 모든 데이터는 LabVIEW 기반의 DAQ 시스템을 이용하여 측정, 기록하였다.

3.2 무유도 솔레노이드형 마그넷의 제작

무유도 솔레노이드형 마그넷은 현재 상용화된 초전도 선재인 AMSC사의 BSCCO-2223 선재를 이용하여 제작하였다. 아래 표 1은 본 실험에 사용된 초전도 선재와 무유도 솔레노이드형 마그넷의 사양을 나타낸다. 임계전류는 $1\mu\text{V}/\text{cm}$ 기준을 적용하여 측정하였다. 그림 2는 제작된 무유도 솔레노이드형 마그넷의 모습과 임계전류를 측정한 그래프를 나타낸다. 무유도 솔레노이드형 마그넷 용 보빈의 재질로는 FRP를 사용하였으며, 외경은 10mm, 두께는 10mm이고 양쪽으로 각각 5mm의 흙을 파서 권선하였다.

표 1. 무유도 솔레노이드형 마그넷의 사양

선재의 단면적	$4.2 \times 0.31\text{mm}^2$
임계전류	$100\text{A}@77\text{K}$, Self-Field
권선수	24 turns
권선길이	740cm
인덕턴스	2H

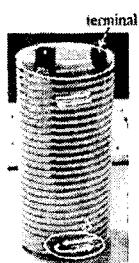


그림 2. 무유도 솔레노이드형 마그넷과 I-V 특성

3.3 측정 시스템의 보정

초전도 마그넷 시스템에서 발생하는 액체질소의 기화량은 일반적으로 극저온 냉각조의 냉각손실과 전류도입선에서 발생하는 발열량, 그리고 초전도 마그넷에서 발생하는 교류손실값을 모두 포함한다. 따라서 초전도 마그넷에서 발생하는 순수한 교류손실값을 알기 위해서는 극저온 냉각조에서 발생하는 냉각손실값과 전류도입선에서의 발열값을 빼야 한다.

그림 1과 같이 실험에 사용된 극저온 냉각조는 지름이 450mm이고 깊이는 460mm인 구조이며 질소기화량의 측정 단위는 Liter Per Minute(LPM)이다. 그럼 3은 발생 열량에 따른 LPM값의 변화를 나타내며 발생열량이 증가함에 따라 LPM의 값도 선형적으로 증가함을 알 수 있다. 본 실험에서 에너지 발열을 위해 NiCr 극저온 히터를 사용하였으며 실험결과, 단위 LPM당 발열에너지의 값은 약 4.4W 정도임을 알 수 있었다. 극저온 냉각조에서 시스템의 손실값은 액체질소의 액면높이에 따라 변화하기 때문에 액면높이를 일정하게 유지하면서 손실값을 측정하는 것이 중요하다. 액체질소의 액면높이가 240mm로 일정할 경우, MFM을 통해 얻은 기화량은 약 7LPM 이므로 극저온 냉각조의 손실값은 31.1W임을 알 수 있다. 또한 전류도입선에 교류전류를 통전시킬 경우 발생하는 발열량의 크기도 이와 같은 방법을 통해 얻을 수 있다. 즉, 초전도 마그넷의 손실은 다음 식 [1]을 사용하여 계산할 수 있다. 모든 실험은 외부 전도열과 복사열에 의해 발생하는 극저온 냉각조 자체의 손실에 영향을 받기 때문에 오차를 최소화하고자 각각 5회씩 반복 측정하였다. 또한 극저온 냉각조 자체의 손실은 액체질소의

$$Q_{AC\ loss} = Q \quad [1]$$

Q_{Total} : 마그넷에 전류 인가시 발생하는 총손실

Q_{BG} : 극저온 냉각조의 냉각손실

Q_{CL} : 전류도입선에 의해 발생하는 손실

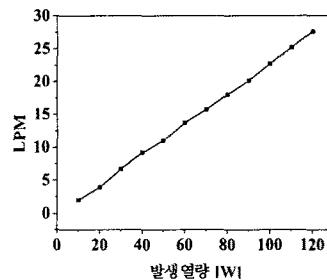


그림 3. 발생열량에 따른 LPM값의 변화

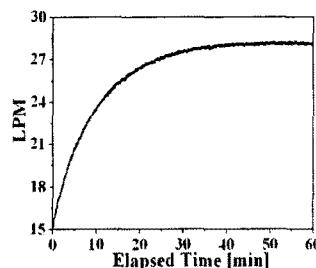


그림 4. 90W의 발생열량에 대한 액체질소 기화량

액면높이와 밀접한 관계를 가지므로 실험 중 액체질소의 양을 레벨미터로 측정하여 일정하게 유지하였다. 그림 4에서 보는 바와 같이 극저온 히터를 사용해서 90W의 열량을 발생시켰을 때, 발생되는 액체질소의 기화량은 40분 정도 후에 28LPM으로 포화되는 것을 알 수 있다.

3.4 무유도 솔레노이드형 마그넷의 교류손실 측정

그림 2와 같이 제작한 무유도 솔레노이드형 마그넷의 교류손실값을 측정하기 위해 마그넷 임계전류의 50~90% 범위에서 운전전류를 10% 단위로 변화시키면서 발생하는 액체질소의 기화량을 측정하였다. 각 전류에 대한 교류손실은 위의 식 [1]을 기본으로 하여 각각의 측정값으로부터 계산하였다. 아래 그림 5는 운전전류의 변화에 따른 교류손실량을 나타낸다.

위의 실험에서 측정된 교류손실량과 이론적으로 추정한 교류손실량의 비교를 위해 식 [2]의 Norris 식을 이용하여 교류손실량을 계산하였다. 무유도 권선이므로 발생되는 자장을 무시하고 아래 식 [2]를 이용하여 위의 실험과 마찬가지 조건인 임계전류의 50%~90% 범위에서 10% 단위로 운전전류를 변화시키면서 이 때 발생하는 교류손실량을 계산하였다.

$$P = \frac{f \cdot \mu_0 \cdot I_c^2}{2\pi \cdot S_f} \cdot g(i_m) \cdot l [W] \quad [2]$$

$$g(i_m) = 2(1 - i_m) \cdot \ln(1 - i_m) + 2i_m - i_m^2$$

$$i_m = \frac{I_p}{I_c}$$

S_r : 선재의 단면적중 초전도체의 비율

I_p : 교류전류의 최대값

I_c : 마그넷의 임계전류

위 식을 이용하여 무유도 마그넷의 운전전류에 따른 교류손실을 계산하면 그림 5와 같다. 계산으로 얻은 손실량보다 실험을 통해 얻은 손실량이 큰 이유는 제작된 무유도 마그넷이 누설자속을 가지고 있기 때문에 완벽한 무유도 권선에 비해 발생하는 자속의 크기가 더 크기 때문이다. 그림 6은 FEM을 사용하여 통전전류가 90A일 때 발생하는 자기장의 세기를 계산한 결과를 나타낸다. 그림에서 보는 바와 같이 무유도 마그넷에 90A가 통전될 때 약 1mT의 자속이 발생하는 것을 알 수 있다. 그림 5에서 보는 바와 같이 통전전류가 증가할수록 계산값과 실험값의 차이가 크게 나는 이유는 발생 자속의 크기가 통전전류의 크기에 비례하기 때문이다. 또한 MFM의 측정 범위에 비해 무유도 마그넷에서 발생하는 기화량이 상대적으로 적다는 것도 오차 발생의 가능성을 크게 하는 요인이다.

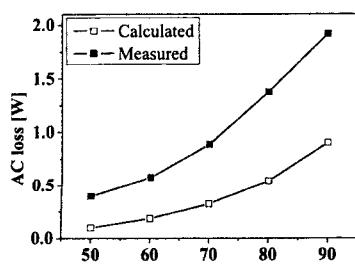


그림 5. 운전전류의 변화에 따른 교류손실량

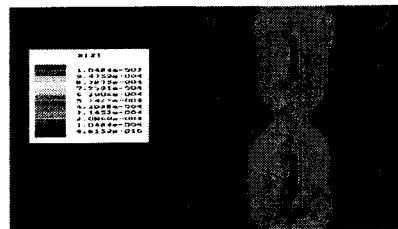


그림 6. 통전전류가 90A일때 발생하는 자기장

3. 결 론

현재 고온초전도 전력기기의 상용화가 임박해 있는 상황에서 초전도 마그넷의 교류손실에 관한 연구는 반드시 필요하다. 대용량급 초전도 마그넷의 교류손실을 측정하기 위해서는 기존의 통전법이나 자화법보다는 열량법을 이용한 측정법이 적절할 것으로 생각된다. 본 연구에서는 소용량의 무유도 솔레노이드형 초전도 마그넷을 제작하여 운전전류의 변화에 따른 교류손실을 측정하였으며, Norris식을 이용해 계산한 교류손실값과 비교하였다. 소용량급 무유도 초전도 마그넷에서는 발생하는 자기장의 크기가 작으므로 측정된 교류손실의 크기도 상대적으로 작았다. 따라서 MFM을 이용해 측정한 결과값은 상당한 오차가 있을 것으로 생각되지만 대용량의 초전도 마그넷에 관한 실험에서는 오차 발생이 상대적으로 크지 않을 것으로 예상된다. 추후 본 논문의 무유도 초전도 마그넷과 같은 사양의 유도성 초전도 마그넷을 제작한 후에 교류손실의 값을 계산, 측정할 계획이다. 본 연구를 통해 얻어진 결과는 13.2kV/630A급 무유도 권선형 한류기 뿐만 아니라 모든 초전도 전력기기 용용분야에 적용될 수 있을 것으로 기대된다.

본 연구는 21세기프론티어 연구개발사업인 차세대초전도용 기술개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

[참 고 문 헌]

- [1] W.T.Norris, "Calculation of hysteresis losses in hard superconductors carrying ac: isolated conductors and edges of thin sheets", J. Phys. D, vol3, pp. 489-507, 1970
- [2] Ji-kwang Lee, Woo-seok Kim, Ji Hoon Kim, Seungwook Lee, Gueesoo Cha and Song-yop Hahn, "Experimental Result of Transport Current Loss in Bifilar Winding Solenoid type HTS Coil", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, VOL11, NO1, pp.2228-2231, March, 2001
- [3] Frank Darmann, Shi Dou, and Chris Cook, "Determination of the AC Losses of Bi-2223 HTS Coils at 77K at Power Frequencies Using a Mass Boil-Off Calorimetric Technique", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, VOL13, NO1, pp.1-6, March, 2003
- [4] 이승우, 이희준, 임정우, 차귀수, 이지팡, "고온초전도 퍼블랜케이크 권선에서 발생하는 교류손실 측정", 한국초전도 저온 공학회 03 학술대회 논문집, pp. 246-249, 2003