

# A Comparison Study of Heat Loss Characteristics in Monofilament and Multifilament Superconducting Coils Driven with AC Currents

S.-m. Hwang, K. Kim\*, C. S. Kang, S.-J. Lee, and Y.-H. Lee

*Korea Research Institute of Standards and Science, Daejeon, Korea*

(Received 1 December 2011 revised 20 December 2011 accepted 21 December 2011)

## 단일필라멘트와 다중필라멘트 초전도 코일의 교류 전류에 의한 발열 특성 비교 평가

황성민, 김기웅\*, 강찬석, 이성주, 이용호

### Abstract

Since superconducting wires have no resistance, electromagnets based on the superconducting wires produce no resistive heating with DC current as long as the current does not exceed the critical current of the wire. However, unlike resistive wires, superconducting wires exhibit AC heat loss. Embedding fine superconducting filaments inside copper matrix can reduce this AC loss to an acceptable level and opens the way to AC-capable superconducting coils. Here, we introduce an easy and accurate method to measure AC heat loss from sample superconducting coils by measuring changes in the rate of gas helium outflow from the liquid helium dewar in which the sample coil is placed. This method provides accurate information on total heat loss of a superconducting coil without any size limit, as long as the coil can fit inside the liquid helium dewar. With this method, we have evaluated AC heat loss of two superconducting solenoids, a 180-turn solid NbTi wire with 0.127 mm diameter (NbTi coil) and a 100-turn filamented wire with 1.4 mm diameter where 7 NbTi filaments were embedded in a copper matrix with copper to NbTi ratio of 6.7:1 (NbTi-Cu coil). Both coils were wound on 15 mm-diameter G-10 epoxy tubes. The AC heat losses of the NbTi and NbTi-Cu coils were evaluated as  $53 \pm 4.7 \mu\text{W}/\text{A}^2\text{Hzcm}^3$  and  $0.67 \pm 0.16 \mu\text{W}/\text{A}^2\text{Hzcm}^3$ , respectively.

*Keywords* : NbTi, filament, AC loss, flowmeter, helium

### I. Introduction

초전도 선재는 특정 임계온도 이하에서는 그 전기저항이 완전히 사라지는 특성 때문에 강한 자기장을 생성할 수 있는 전자석에 사용하기에 적합하다. 전자석이 강한 자기장을 생성하기

---

\*Corresponding author. Fax : +82 42 868-5676

e-mail : kwkim@kriss.re.kr

위해서는 좁은 공간에 도선을 여러 겹 뻗뻗이 감아야 하고 또 도선에 큰 전류를 흘려주어야 하기 때문에 도선에 미미한 정도라도 전기 저항이 있으면 도선에 흘리는 전류의 제공에 비례하는 저항 발열 때문에 전자석에 흘릴 수 있는 전류의 한계가 있게 된다. 그러나 저항이 전혀 없는 초전도 선재의 경우에는 이러한 한계가 완전히 사라진다. 그 반면에 초전도 선재는 흐르는 전류와 선재에 가해지는 자기장의 변화에 민감해 이에 따라 임계 전류가 낮아지거나 국부적인 발열이 생기므로 초전도 선재로 제작한 초전도 전자석은 변하지 않는 일정한 자기장을 만들어 내는 경우에 주로 쓰인다. 또한 이때에도 초전도 전자석을 켜 때와 끌 때의 전류 변화에 의해 초전도가 깨지는 퀸치(quench) 현상을 방지하기 위하여 전류를 서서히 늘리고 또 줄여야 한다는 제한이 생긴다 [1].

이러한 초전도 자석의 제한 때문에 교류 자기장 또는 시간에 따라 변화하는 자기장을 생성해야 하는 경우에는 초전도 자석 보다는 저항 발열을 감수하면서 저항 선재인 구리를 사용한 전자석을 주로 사용한다. 단면적이 넓은 도선을 쓰는 방식으로 도선의 길이 당 저항을 줄여 발열을 줄일 수도 있지만 이는 전자석 자체의 크기를 커지게 한다는 문제가 있다. 전자석의 총 저항은 도선의 단면적에 선형적으로 반비례하기 때문에 단순히 도선을 굵게 하는 것으로는 전류의 제공에 따른 발열량의 증가를 따라갈 수 없으며 더욱이 전자석이 커질수록 단위 전류 당 추가되는 도선 부분이 전자석 중심에서 생성하는 자기장의 세기가 줄어들어 그 효율이 떨어진다. 또한 전자석을 액화질소 등의 냉매로 냉각해서 코일의 저항을 떨어뜨리면 그 제공근만큼 전류를 더 구동할 수 있기는 하지만 제한적이며 전류의 제공에 비례하는 저항 발열의 근본적인 문제 해결은 되지 못한다.

그래서 강한 세기의 교류 또는 시간에 따라 변화하는 자기장이 필요한 경우에는 변화하는 전류에 약한 특성에도 불구하고 초전도 전자석을 사용해야 하기 때문에 교류 전류에도 초전도 성능을 유지하면서 교류 발열이 적은 필라멘트형 초전도체 도선이 만들어졌으며 이러한 초전도선으로 초전도 전자석을 만들어 사용한

다.

하지만 단순히 전류의 제공과 도선의 저항에 비례하는 저항 발열과 달리 초전도체의 교류 발열은 복잡한 물리적 과정을 거쳐서 나타나며 도선의 필라멘트 수, 흘려준 전류와 임계전류의 비, 선 꼬임 피치 등 구성에 따라 크게 달라지기 때문에 도선의 크기와 구조 만으로는 쉽게 예측하기 힘들다. 그러므로 해당 초전도체 도선의 발열량을 정확히 용이하게 측정할 수 있는 방법이 필요하다.

초전도체의 교류 발열을 측정하는 방법은 크게 비교 발열기를 이용한 간접 열량 측정 방식 [2]과 국부적인 교류전압 측정을 통한 교류전력 측정 방식이 있다 [3, 4]. 간접 열량 측정 방식은 측정 대상 초전도체와 동일한 모양과 크기의 발열체를 놓고 이 발열체에 직류전류를 흘려 측정 대상과 동일한 온도 상승이 되도록 한 다음 이 발열체에 흘리는 전류로 인한 발열량을 계산해서 그것을 측정 대상 초전도체에서 발생하는 발열량으로 구하는 방법이다. 반면에 교류전력 측정 방식은 측정 대상 초전도체 중 직선부분을 골라 그 양단의 교류전압을 측정해서 교류전력을 계산하는 방식이다.

이 두가지 방법 모두 초전도체 도선 자체의 국부적인 교류발열 특성을 정밀하게 측정할 수 있는 방법이지만 크기가 큰 초전도 코일 전체의 교류발열 측정에는 적합하지 않다. 또한 초전도체로 코일을 구성할 시 코일이 생성하는 자기장이 다시 초전도체에 가해지기 때문에 단순히 선재의 단위 길이당 발열량을 국부 열량계로 측정한 결과를 단순하게 초전도 코일 전체로 일반화 하는 것도 곤란하다.

이 논문에서는 초전도체 코일을 액체헬륨 듀아에 담가 코일에 교류 전류를 흘려 주어서 이 교류 전류의 진폭과 진동수에 따른 액체 헬륨의 증발량을 측정해서 초전도체 코일의 교류 발열량을 측정할 수 있는 방법을 소개한다. 그리고 NbTi 초전도체 단선과 7개의 NbTi 필라멘트가 구리에 박혀있는 형태의 필라멘트형 초전도 선재의 교류 발열을 실제로 측정하고 비교해 보았다. 또한 이 방법은 국부 열량계를 사용하는 방법과 달리 듀아 전체의 열 흡수량을 기체 헬륨의 유량 변화를 통해 측정하므로 초전도 코일의 크기에 구애 받지 않아 실제로

사용할 초전도 코일의 발열을 손쉽게 측정할 수 있다.

## II. Theory

초전도 도선에는 전류의 흐름에 의한 저항 발열이 없다. 하지만 초전도 선재에 가해지는 자기장의 변화에 의한 에너지의 손실, 즉 발열이 발생하는데 이 중 초전도체 자체에서 나타나는 것은 자기이력 손실(hysteresis loss)이다 [1]. 자기이력 손실은 임계 전류가 높은 제 2종 초전도체에 공통적으로 나타나는 자속 고정 현상에서 도선에 흐르는 전류가 생성하는 자기장의 변화에 의해 고정되어 있던 자속이 그 자리를 이탈해 다른 곳에 다시 고정되는 열적 비가역적 과정에서 발생하는 에너지 손실로 그 양은 다음과 같다.

$$\dot{Q}_h = B J_c \frac{2d}{3\pi} \left( 1 + \left( \frac{I_l}{I_c} \right)^2 \right) \quad (1)$$

여기서  $Q_h$ 는 자기이력 손실 에너지,  $B$ 는 도선에 가해지는 자기장,  $J_c$ 는 도선의 임계전류밀도,  $d$ 는 도선의 지름,  $I_l$ 는 도선에 실제로 흐르는 전류, 그리고  $I_c$ 는 임계전류이다.

수식 1에서 볼 수 있듯이 자기이력 손실은 초전도 도선이 굵을수록 커지므로 그 손실을 줄이기 위해서는 도선을 가늘게 해야 한다. 그러나 도선이 가늘어질수록 임계전류는 줄어드는데 자기이력 손실은 도선 지름에 비례하는 반면 임계전류는 도선 지름의 제곱에 비례하는 도선의 단면적에 비례한다. 그러므로 굵은 도선 하나를 사용하는 것 보다 가는 도선 여러 가닥을 묶어서 같은 단면적이 나오도록 하면 임계전류를 유지하는 동시에 자기이력 손실을 줄일 수 있다.

이렇게 가는 초전도체 필라멘트를 여러 가닥 묶은 형태의 초전도선을 구성할 때 필라멘트 사이의 간격은 주로 구리 또는 구리 합금 등의 기지재료(matrix)로 채우고 또 그 외경을 다시 구리로 감싸 하나의 굵은 선을 만든다. 이 때 이 기지재료가 하는 역할은 초전도체 필라멘트 사이를 채우는 역할 외에 1) 자기이력 손실에

의해 초전도체, 그 중 특히 도선의 중심부에서 발생하는 열을 빠르게 도선 외부로 전달, 냉각해 온도가 높아지지 않도록 하고 2) 초전도체에 국부적으로 초전도성이 깨지는 퀸칭(quenching)이 발생할 때 전류가 정상상태가 된 초전도체의 저항보다 훨씬 낮은 기지재료를 통한 상대적으로 저항이 작은 경로를 마련하는 역할 등이 있다. 그러나 이런 형태로 초전도선을 구성하면 변하는 자기장에 의해 기지재료를 통해 흐르는 와류(eddy current)가 발생하며 이에 의한 결합 손실(coupling loss)가 발생한다 [1]. 이 결합 손실은 초전도선을 꼬아 기지재료를 통해 흐르는 경로를 짧게 만드는 것으로 줄일 수 있는데 결합 손실은 아래와 같은 수식으로 표현한다.

$$\dot{Q}_c = \frac{B_i^2}{\mu_0} 2\tau \quad (2)$$

여기서  $Q_c$ 는 결합손실 에너지,  $B_c$ 는 도선 내부에 형성되는 자기장,  $\tau$ 는 기지재료의 저항 발열을 통한 와류의 감쇠시간이며  $\mu_0$ 는 진공투자율이다.

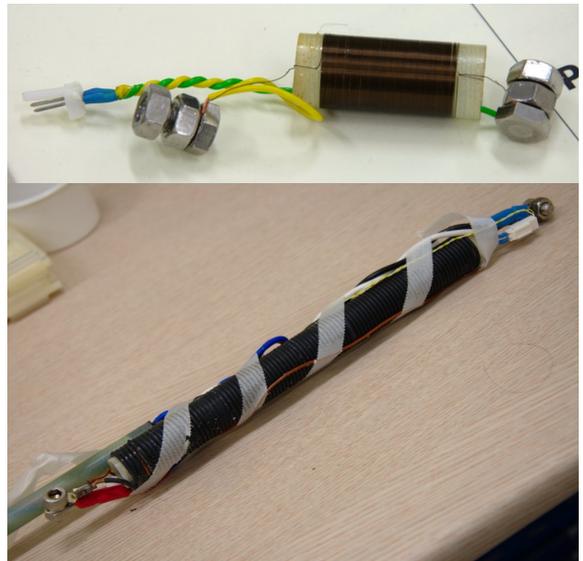


Fig. 1. Sample coils of superconducting wires. (a) (above) Single enamel-insulated NbTi wire with no Cu matrix. (b) (below) Uninsulated multi-filament wire with seven NbTi filament encased in Cu matrix and 6.7:1 Cu-NbTi ratio, insulated with heat-shrink tube.

### III. Experiment

초전도선의 교류발열은 저항발열과 달리 복잡한 물리적 과정을 거쳐서 나타나고 또 사용하는 도선의 필라멘트 수, 흘려준 전류와 임계 전류의 비, 선 꼬임 피치 등 구성에 따라 크게 달라질 수 있으므로 사용할 도선의 실제 교류 발열을 측정해서 도선의 발열특성을 정량화 할 필요가 있다.

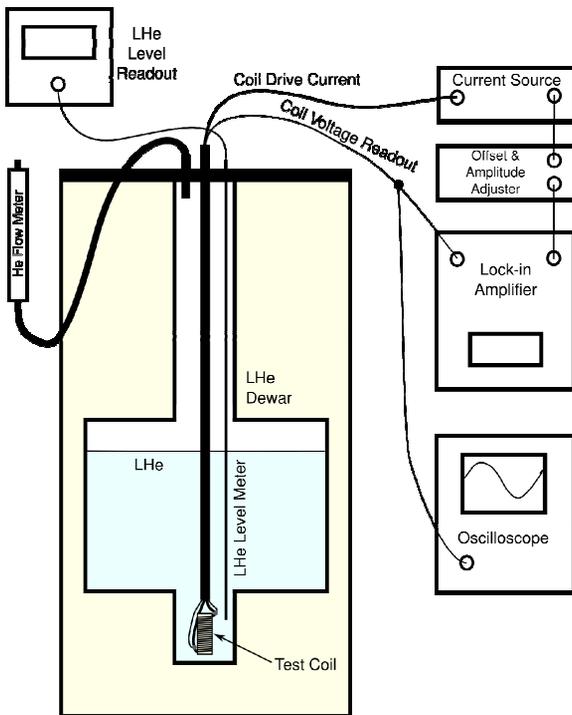


Fig. 2. AC loss measurement setup. The current source was controlled by the lock-in amplifier via offset & amplitude adjuster circuit. The voltage across the sample test coil was picked up via 4-wire Kelvin connection and was fed to the lock-in amplifier for accurate voltage reading. The heat generated by the coil was measured via change in helium gas outflow measured with a flow meter. The gas outflow measurement was further calibrated with a liquid helium level meter.

시험 대상으로 한 초전도선은 두 가지이다: 1) 기지재료 없이 NbTi로만 이루어진 직경 0.127 mm의 도선 (Supercon Inc.; 이하 NbTi 도선), 2) 구리 기지재료 속에 일곱 가닥 NbTi가

들어있는 직경 1.4 mm 도선 (Kiswire Ltd.; 이하 NbTi-Cu 도선). NbTi-Cu 도선의 구리와 NbTi 비율은 6.7:1 이다. NbTi 도선은 외경이 15 mm 인 G-10 에폭시 관에 180턴을 감았으며 유효 임피던스 ( $Z_{eff}$ ) 계산을 위한 초전도 도선의 전압 측정용으로 Fig. 1(a)와 같이 4선 켈빈 단차 처리를 했다. NbTi-Cu 도 마찬가지로 준비 했지만 에나멜로 코팅 된 NbTi와 달리 도선 자체에 절연이 되어있지 않아 Fig. 1(b)와 같이 열 수축관으로 우선 절연한 후 같은 외경의 에폭시 관에 100턴을 감았다. 두 도선의 유효부피는 NbTi 0.107 cm<sup>3</sup>, NbTi-Cu 6.9 cm<sup>3</sup> (구리 기지재 포함) 이었으며 인덕턴스는 각각 160  $\mu$ H, 6.0  $\mu$ H 이었다.

실험 장치는 Fig. 2와 같이 구성했다. 초전도 코일은 액체 헬륨 용 단열 듀아에 담긴 액체 헬륨을 통해 4.2 K로 냉각했고 코일에 흘려줄 전류용 도선과 코일 양단의 전압 측정용 도선을 외경 10 mm인 G-10 에폭시 관을 통해 듀아 외부로 빼 냈다. 듀아 뚜껑의 기체 헬륨 배출구에 기체 유량 측정기 (GF-1260, Gilmont Instruments)를 장착해 기체 헬륨의 배출량을 측정했고 이 기체 유량 측정기는 다시 액체 헬륨 수위 측정기로 보정해서 액체 헬륨의 소모량을 직접 측정했다. 포화 상태의 액체 헬륨과 대기압 273 K의 기체 헬륨의 엔탈피 차이 1.42 kJ/g와 [5] 포화 상태 액체 헬륨의 부피 대 질량 비 8.01 cm<sup>3</sup>/g을 [6] 통해 계산 한 액체 헬륨의 단위 부피 당 엔탈피 차이 178 kJ/L을 통해 코일의 발열량을 계산했다.

전류 공급기는 DC 임계전류 측정에 Chroma 62050P-80-60 (Chroma ATE Inc., 80 V, 60 A, 2.4 kW)를 사용했고 교류 발열 측정에는 BOP 20-10M (Kepco Inc., 20 V, 20 A, 200 W)을 Fig. 2와 같이 lock-in 앰프 Model 5210 (EG&G Princeton Applied Research)에 연결 해 사용했다. Lock-in 앰프와 전류 공급기 사이에는 전압 증폭 및 DC 오프셋 추가 회로를 추가해서 lock-in 앰프의 진폭이 2 V인 조정 출력으로 전류 공급기가 공급하는 전류의 진폭을 조절할 수 있도록 했다. Chroma 62050P-80-60의 입력 전압 대 출력 전류의 비율은 12 A/V 였으며 BOP 20-10M의 비율은 1 A/V 이었다.

초전도체의 발열량 [1, 7-8]은 외부 자기장의

변화가 없을 때 초전도체에 공급되는 전류에 비례하는 자기장의 변화에 의존하므로 단위 진동수, 단위 전류 제곱, 단위 도선 부피 당 발열량 ( $W/HzA^2m^3$  또는  $J/A^2m^3$ )으로 표시한다. 이에 따라 전류 공급기의 전류 공급에 한계가 있으므로 실험의 조절변수로 전류의 진폭 보다 전류의 진동수를 사용하는 방법을 선택했다.

**IV. Result**

초전도체 코일의 발열을 측정하기 전 코일에 연결되는 전류 공급 도선의 자체 저항과 발열량을 측정하기 위하여 코일 없이 전류 공급 도선을 단락시켜 액체 헬륨 듀아에 넣은 다음 전류를 진폭 29 A, DC 오프셋 30 A의 40 Hz 사인파형으로 공급했다. 그 결과 기체 헬륨 발생량 증가를 통해 측정된 발열은 측정 한계인 0.1 W (듀아 열 유입량의 1 %) 보다 낮아 측정이 불가능 했다. 그러므로 실험 과정에서 발생하는 발열은 전류 공급 도선이 아닌 모두 초전도체 코일에서 발생하는 교류 발열이라고 할 수 있다. Lock-in 앰프로 측정한 액체헬륨 듀아의 뚜껑에서 측정한 전류 공급 도선의 교류 전압은  $217 \mu V_{rms}$ 로 듀아 내부의 전류 공급 도선 저항은  $21.2 \mu\Omega$ 로 확인 되었다.

코일의 임계전류는 NbTi의 경우 6.03 A로 측정 되었으며 NbTi-Cu의 경우 전류 공급기의 출력 한계인 60 A 이상인 것으로 확인됐다.

Table 1. Heat dissipation measurements for NbTi coil. f indicates the frequency of the AC current,  $P_d$  the calculated heat dissipation, and I the amplitude of the AC current.

f (Hz)	$P_d$ (W)	I (A)	$P_d/I^2$ ( $mW/A^2$ )	$P_d/I^2f$ ( $\mu W/A^2Hz$ )
1 k	0.42	5.8	6.2	6.24
3.33 k	1.26	5.8	18.7	5.62
10 k	2.52	4.9	52.5	5.25
17.05 k	3.36	3.5	137	8.04

NbTi의 교류 발열량은 전류가 코일의 임계 전류를 넘지 않도록 전류의 진폭을 6 A로 잡고 (3 A  $\pm$  3 A) 진동수를 20 Hz에서 코일의 초전도 상태가 깨진 17.06 kHz까지 늘려가면서 측정했

다. 전류 공급기 자체의 대역폭 한계와 코일의 인덕턴스에 의해 진동수가 커지면서 실제 공급되는 전류의 진폭이 감소했는데 이것도 함께 측정해 Table 1에 기록했다. 발열량이 측정 한계보다 작은 경우는 표에서 제외했다. Table 1에 정리 된 측정 결과 중 발열이 미미해 측정 한계 이내인 경우와 초전도가 깨지기 시작한 부분을 제외한 1 kHz, 3.33 kHz, 10 kHz 측정치 만으로 평균을 낸 단위 진동수, 단위 전류 제곱 당 발열량은  $5.7 \pm 0.5 \mu W/A^2Hz$ 이며 이 값을 다시 코일의 유효부피  $0.107 cm^3$ 으로 나누면  $53 \pm 4.7 \mu W/A^2Hzcm^3$  이다.

Table 2. Heat dissipation measurements for NbTi-Cu coil. The symbols are the same as in Table 1.

f (Hz)	$P_d$ (W)	I (A)	$P_d/I^2$ ( $mW/A^2$ )	$P_d/I^2f$ ( $\mu W/A^2Hz$ )
500	0.53	17.4	1.8	3.5
1 k	1.11	17.4	3.7	3.7
2 k	2.97	17.0	10	5.1
5 k	7.26	15.3	31.0	6.20
10 k	6.73	12.0	46.7	4.67
20 k	4.13	7.7	70	3.5
50 k	0.53	2.4	92	1.8

NbTi-Cu의 발열량 측정은 코일의 임계전류가 충분히 크므로 전류의 진폭을 보다 큰 17.4 A로 잡고 ( $\pm 8.7 A$ ) 진동수를 20 Hz에서 50 kHz 까지 늘려가면서 측정했다. 이 과정에서 도선의 초전도성은 계속 유지 되었으며 위의 경우와 마찬가지로 전류 공급기 자체의 대역폭 한계와 코일의 인덕턴스에 의해 진동수가 커지면서 실제 공급되는 전류의 진폭이 감소했는데 이것도 함께 측정해 Table 2에 기록했다. 역시 발열량이 측정 한계보다 작은 경우는 표에서 제외했다. Table 2에 정리 된 측정 결과 중 역시 발열이 미미해 측정 한계와 근사하거나 그 이내인 경우를 제외한 1 kHz와 20 kHz 사이의 측정치 만으로 평균을 낸 단위 진동수, 단위 전류 제곱 당 발열량은  $4.6 \pm 1.1 \mu W/A^2Hz$ 이며 이 값을 다시 코일의 유효부피  $6.9 cm^3$ 으로 나누면  $0.67 \pm 0.16 \mu W/A^2Hzcm^3$  이다.

Table 1과 2와 같이 측정된 단위 진동수, 단

위전류 제공 당 발열량이 코일에 흘러 준 전류에 영향을 받는지 여부를 확인하기 위해 추가로 전류의 진동수를 5 kHz로 고정해 놓고 lock-in 앰프의 조정 출력 진폭을 줄이는 방법으로 코일에 공급되는 교류 전류의 진폭을 바꾸면서 별도로 측정된 발열량을 Table 3에 기록했다. 발열량이 측정 한계치에 가까운 1 W 이하로 떨어지는 경우를 제외한 세 개의 측정치를 비교해 보면 단위 전류 제공 당 발열량에 변화가 없는 것을 알 수 있다.

Table 3. Heat dissipation measurements for NbTi-Cu coil with a fixed frequency of 5 kHz and variable currents. The symbols are the same as in Table 1.

I (A)	$P_d$ (W)	$P_d/I^2$ (mW/A <sup>2</sup> )	$P_d/I^2f$ ( $\mu$ W/A <sup>2</sup> Hz)
15.4	6.84	28.8	5.77
11.5	3.92	29.6	5.93
7.6	1.6	28	5.7
3.76	0.53	37.5	7.50
1.83	0.21	63.3	12.7

## V. Discussion

Table 1에서 계산한 NbTi의 단위 진동수, 단위 전류 제공, 단위 부피 당 발열량  $53 \pm 4.7 \mu\text{W}/\text{A}^2\text{Hzcm}^3$ 을 가지는 초전도체 도선에 100 A의 교류 전류를 흘려준다면 교류 한 사이클 당  $530 \pm 47 \text{ mW}/\text{cm}^3$ 의 단위 부피 당 발열량을 가진다. 반면에 Table 2에서 계산한 NbTi-Cu의 경우 마찬가지로 100 A의 교류 전류를 흘리는 경우 교류 한 사이클의 단위 부피 당 발열량은  $6.7 \pm 1.6 \text{ mW}/\text{cm}^3$ 이다. 이는 NbTi의 1.3%에 불과하며 구리를 제외한 초전도체 부피 기준으로 환산해도 9.7%에 지나지 않는다.

이상 본 논문에서는 액체헬륨의 증발량 측정을 통해 초전도체 도선의 교류 발열량을 정확하게 측정할 수 있는 방법을 소개했으며 또한 이 방법을 이용해 수행한 교류 발열량의 측정 결과를 토대로 NbTi 단일 도선에 비해서 NbTi 필라멘트 여러가닥을 구리 기지재로 감싼 복합 도선의 교류 발열량이 획기적으로 낮다는 것을

알 수 있었다. 또한 이런 방식으로 측정된 도선의 교류 사이클 당 단위 부피 당 발열량을 통해서 해당 도선으로 제작하는 초전도 전자석 코일의 교류 발열량을 예측할 수 있다.

## Acknowledgement

본 연구를 위해 초전도선 샘플을 제공해 준 Kiswire에 감사 드립니다.

## References

- [1] Martin N. Wilson, "NbTi superconductors with low ac loss: A review", *Cryogenics* **48**, 381-395 (2008).
- [2] P. Dolez, M. Aubin, D. Willen, R. Nadi, and J. Cave, "Calorimetric ac loss measurements of silver sheathed Bi-2223 superconducting tapes", *Supercond. Sci. Technol.* **9**, 374 (1996).
- [3] J. J. Rabbers, B. ten Haken, and H. H. J. ten Kate, "Advanced ac loss measurement methods for high-temperature superconducting tapes", *Rev. Sci. Instr.* **72**(5), 2365-2373 (2001).
- [4] Z. Jiang and N. Amemiya, "An experimental method for total AC loss measurement of high  $T_c$  superconductors", *Supercond. Sci. Technol.* **17**, 371 (2004).
- [5] National Bureau of Standards, Technical Note No. 154 (1962).
- [6] Ronald Berman and C. F. Mate, "Some thermal properties of helium and their relation to the temperature scale", *Phil. Mag.* **3**, 461-469 (1958).
- [7] Kazuya Ohmatsu, Hiroyasu Yumura, Ken-ichi Takahashi, Ken-ichi Sato, Takeshi Ueda, and Yoshinobu Suganuma, "Development of Nb-Ti Cable with Ultrafine Filament and High-Resistivity Matrix for ac Use", *Elec. Eng. Japan* **120**(2), 8-18 (1997).
- [8] Katsumi Miyashita, Hiroyuki Sato, Mitsuhiro Arika, and Ryukichi Takahashi, "Development of NbTi Superconducting Strands and Cables for the Field Winding of a 200-MW-class High-Energy-Density Superconducting Generator", *Elec. Eng. Japan* **156**(3), 24-31 (2006).