

Estimation of the critical current of CORC[®] conductor using the measured magnetization losses

Jinwoo Han^a, Ji-Kwang Lee^b, Kyeongdal Choi^a, and Woo-Seok Kim^{a,*}

^a Tech University of Korea, Gyeonggi-do, Korea

^b Woosuk University, Jeollabuk-do, Korea

(Received 6 December 2022; revised or reviewed 27 December 2022; accepted 28 December 2022)

Abstract

Since CORC[®] (Conductor on Round Core) is made of multiple strands of a superconducting tape to conduct a large current, it is difficult to measure the critical current due to the limitation of a capacity of a power supply. The magnetization loss of a superconductor is dependent on the full penetration field. The full penetration field corresponds to the inflection point of the magnetization loss graph with respect to the external magnetic field. We propose a method to predict the critical current of CORC[®] indirectly. This method uses the measured magnetization losses of various CORC[®] samples for the prediction of the critical currents.

Keywords: large current conductor, CORC, magnetization loss, critical current density

1. 서 론

2세대 고온 초전도 선재를 사용한 초전도 도체들은 여러 가닥의 초전도 선재를 다양한 방식으로 구성하여 제작한다. 대전류를 통전시키기 위한 목적으로 사용되는 초전도 도체의 경우, 선재들을 병렬로 적층하는 방식을 기본적으로 사용한다. 이때, 각 소선간의 전류 분류를 균일하게 하기 위해서 선재를 전위시키거나 꼬임을 가지는 형태로 제작한다 [1-3]. 이러한 특징을 가지는 대표적인 도체 중 하나로 CORC[®](Conductor on Round Core)를 예로 들 수 있다. CORC[®]는 원통형 포머에 선재를 나선형으로 권선하여 제작하고, 이러한 나선형의 선재들은 모두 동일한 인덕턴스를 가지게 되어 균등한 전류 분류를 가질 수 있다. 이러한 형태는 선재를 RACC(Roebel Assembled Coated Conductor)처럼 잘라내지 않고 온전하게 선재를 사용할 수 있고 다른 초전도 도체에 비해 비교적 쉬운 제작 공정을 가진다는 장점이 있다. 이러한 CORC[®] 도체를 다양한 응용 분야에 적용하기 위한 연구들이 진행되고 있다 [4-6].

대전류용 초전도 도체를 사용하기 위해서는 기본적으로 도체의 임계전류 특성에 대해 알아야 한다. 여러 가닥의 선재를 사용하여 제작되는 대전류 초전도 도체의 경우 임계전류 측정을 위해 필요한 전류의 통전 용량이 매우 높기 때문에, 측정에 어려움을 가진다. 또한, 일반적인 임계전류 측정 방법은 선재의 특정 위치에 전압 탭 등을 연결하여 측정을 진행하기 때문에 필수적으로 선재에 손상을 줄 수 밖에 없다.

중횡비가 매우 큰, 얇은 박막 형태의 고온 초전도 선재의 경우, 외부에서 인가되는 교류자기장에 의해 발생하는 자화손실은 초전도층에 수직으로 인가되는 수직자기장에 의해 결정된다. 이러한 수직자기장에 의한 자화손실은 외부 자기장의 초전도체로의 침투가 완료되는 완전침투 자기장의 크기를

기준으로 손실의 발생 경향이 달라진다 [7].

본 논문에서는 이러한 자화손실 발생 메커니즘이 달라지는 것을 근거로 초전도 도체의 자화손실 측정 결과를 이용하여 도체의 임계전류를 추정할 수 있는 방법을 살펴본다. 자화손실의 측정은 비파괴, 비손상의 방식으로 대용량의 전원 없이 도체의 임계전류를 손쉽게 예측할 수 있다.

2. CORC[®] 형상 및 자화 손실 측정

2.1. CORC[®]의 형상 및 샘플 제작

CORC[®]는 원통형 포머(former)에 선재를 나선형으로 권선하는 방식으로 제작한다. CORC[®]의 권선 방법은 그림 1에 나타냈다. CORC[®]는 포머의 크기 및 권선되는 초전도 선재의 폭, 선재 수, 권선 피치(Pitch) 등에 따라 다양한 형상을 가진다. 이때, 선재를 나선형으로 권선하는 과정에서 발생하는 변형으로 인해 초전도 선재에 손상을 발생시켜 임계전류가 감소할 수 있다. 따라서, 본 연구진은 선행 연구를 통해 임계전류의 감소가 없는 포머의 직경 및 권선 피치를 선정하였다. CORC[®]의 임계전류를 추정하기 위해서 우선 CORC[®]의 수직 자화손실 측정 값이 필요하다. 자화손실 측정을 위한 CORC[®] 샘플의 경우 포머가 외부 자계에 의한

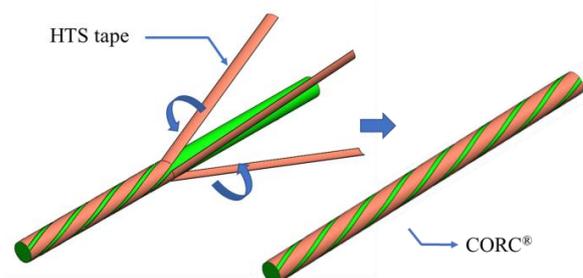


Fig. 1. CORC[®] Manufacturing Method.

*Corresponding author: wskim@tukorea.ac.kr

TABLE I
SPECIFICATION OF THE HTS WIRE.

Specification	Value
Manufacturer	SuNAM
Stabilizer	Copper
Thickness	0.15 [mm]
Thickness of superconducting layer	1 [μm]
Critical Current	6 [mm] width @77K, 338 [A]
	4 [mm] width @77K, 242 [A]

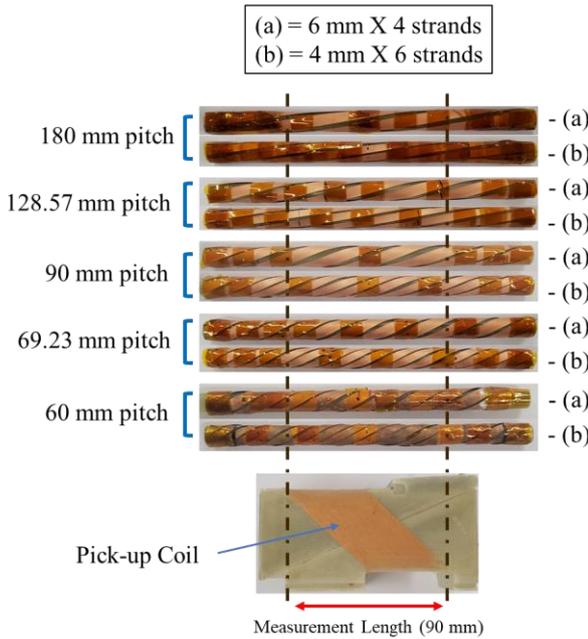


Fig. 2. CORC® Sample and LPC Coil for Magnetization Loss Measurement.

손실측정에 영향을 주지 않아야 하기 때문에 FRP(Fiber reinforced Plastic) 재질의 포머를 사용하였다. 포머의 직경은 10 mm, 길이는 180 mm 이다. CORC® 샘플의 제작에 사용된 초전도 선재는 SuNAM 사의 구리 안정화층을 가지는 선재를 사용하였다. 사용 선재의 재원은 표 1에 나타났다. CORC® 샘플의 권선 피치는 자화손실을 측정하는 영역에 포함되는 피치의 비율을 변화시키며 제작하였고, 6 mm 폭 선재는 4가닥, 4 mm 폭 선재는 6가닥을 포머의 원주를 따라 병렬 배치하였다. 제작한 샘플의 사진은 그림 2에 나타났다.

2.2. 자화손실 측정 시스템

CORC® 샘플의 자화손실 측정은 LPC(Linked Pick-up Coil)시스템을 사용하여 측정하였다[8]. 사용한 LPC 시스템의 회로도 는 그림 3에 나타났다. LPC 시스템은 외부 마그넷을 이용하여 교류 자기장을 인가하고, 마그넷 중심에 픽업코일(Pick-up Coil)과 캔슬코일(Cancel Coil)을 배치시키며 픽업코일의 중심에 자화손실을 측정할 샘플을 위치시킨다. 외부 마그넷은 새들(Saddle) 형태의 마그넷이며, 샘플 및 픽업, 캔슬 코일이 위치하는 마그넷 중심부의 영역에서는 99 %의 균일도를 가지는 외부자기장을 인가할 수 있다. 샘플의 자화손실 측정은 외부 마그넷에 60 Hz 교류 전류를 5 A 단위로 75 A까지 통전시켜 CORC® 샘플에 최대 0.1 T의 균일한

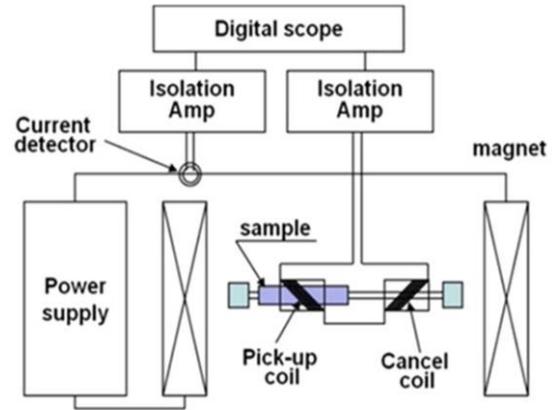


Fig. 3. Linked Pick-up Coil System Schematic.

TABLE II
SPECIFICATION OF THE CORC® SAMPLES.

One Pitch length [mm]	Pitch ratio in the measured length	Sample classification (Pitch ratio / Tape width / Number of tapes)
180	0.5	0.5 pitch / 6 mm / 4
		0.5 pitch / 4 mm / 6
128.57	0.7	0.7 pitch / 6 mm / 4
		0.7 pitch / 4 mm / 6
90	1	1 pitch / 6 mm / 4
		1 pitch / 4 mm / 6
69.23	1.3	1.3 pitch / 6 mm / 4
		1.3 pitch / 4 mm / 6
60	1.5	1.5 pitch / 6 mm / 4
		1.5 pitch / 4 mm / 6

자기장을 인가하여 측정을 진행하였다. 픽업코일은 외부 자기장을 인가할 경우 발생하는 샘플의 손실을 샘플링하고, 캔슬코일은 외부 자기장으로 인해 픽업코일에 발생하는 유도전압을 상쇄시킴으로 샘플의 손실값만을 측정할 수 있도록 픽업 코일과 역 결선되어 있다. 픽업코일의 길이는 90 mm이며, 코일의 한 턴은 30 mm × 30 mm의 면적을 가지는 사각형의 형태로 구성된다. 이때, 픽업 코일의 측정 영역에 포함되는 CORC®의 권선 피치의 비율을 다르게 하여 CORC® 샘플을 제작하였고, 자세한 샘플의 사양은 표 2에 나타났다.

픽업코일과 캔슬코일에서 측정한 전압과, 외부 자기장의 전류로부터 측정된 전류값으로부터 자화손실 측정값은 식(1)과 같이 구할 수 있다.

$$Q_m = \frac{C_{pu}k}{V_s} \int_0^T v(t) \cdot i(t) dt \tag{1}$$

여기서, V_s 와 T 는 LPC 내의 초전도체의 체적과 외부인가 교류자기장의 주기를 나타낸다. k 는 자기장 인가용 외부 마그넷의 자석상수로서 0.978 [mT/A]의 값을 갖으며, C_{pu} 는 픽업코일의 보정 상수이다.

3. 자화손실 측정 결과를 이용한 임계전류 추정

3.1. 임계전류 추정 방법

2세대 고온 초전도 선재에서 발생하는 자화손실은 브란트(Brandt)가 주장한 수식을 통하여 계산할 수 있다 [9]. 브란트의 수식은 초전도 선재에 수직인 방향으로 인가되는 자기장과 임계전류 밀도, 완전 침투 자장 등의 요인들이 반영되어 있다. 자화손실 계산 수식을 활용한다면 임계전류를 추정하는 것이 가능하다. 임계전류를 추정하는 수식을 유도하기 위해서는 먼저 외부 인가 자기장의 크기에 따른 초전도 선재의 완전 침투 자기장의 크기를 알아야 한다. 이를 위해 자화손실 계산 수식을 정규화 시키는 작업이 필요하다. 정규화된 자화손실 계산 수식은 식 (2)와 같다.

$$\begin{aligned} \text{Normalized loss} &= \frac{Q_m}{B_m^2} \\ &= \frac{2\mu_0}{d\beta} \left[\frac{2}{\beta} \ln(\cosh \beta) - \tanh \beta \right] \end{aligned} \quad (2)$$

위 식 (2)에서 Q_m 은 단위체적당 주파수당 자화 손실 값, B_m 은 외부인가 수직방향 자장의 최대값, μ_0 는 진공의 투자율, d 는 초전도 층의 두께, ω 는 초전도층의 폭을 나타낸다. β 는 B_m 과 선재의 완전침투 자장의 비를 나타낸다. 이때, β 를 수식으로 나타내면 식 (3)과 같이 표현할 수 있다.

$$\beta = \frac{B_m}{B_a} = \frac{\pi B_m}{\mu_0 J_c d} \quad (3)$$

위 식 (3)에서 B_a 는 완전 침투 자기장, J_c 는 임계전류 밀도를 나타낸다. 식 (3)에서 알 수 있듯이 완전침투 자장은 임계전류 밀도와 연관성을 가진다. 이때, CORC[®] 샘플에서 측정된 자화손실을 정규화하여 나타낸 그래프의 최댓값은 완전침투 자기장과 연관성을 가진다. 정규화된 손실 그래프 상에서 최댓값을 가질 때의 인가 자기장의 값과 β 값을 알 수 있다면 위 수식들을 활용하여 임계전류를 추정할 수 있다. 정규화된 손실 그래프에서 최대의 값을 가지는 β 의 값을 구하기 위해서는 식 (2)를 미분하여 0이 되는 지점을 찾아 구할 수 있다. 미분 값이 0이 되는 β 값을 계산하면 $\beta=2.4642$ 의 값을 가진다. 식 (3)을 임계전류 밀도에 대한 수식으로 정리하면 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$J_c = \frac{1}{2.4642} \frac{\pi B_{mp}}{\mu_0 d} \quad (4)$$

위 식 (4)에서 B_{mp} 는 정규화된 손실 그래프에서 최대 손실 값을 가질 때의 수직방향 인가 자기장의 값을 나타낸다. CORC[®]의 경우 나선형 구조를 가지고 있기 때문에 외부에 균일한 자기장이 인가되었을 때 각 선재의 위치에 따라 선재가 경험하는 수직 방향 자기장의 성분은 달라지게 된다. 따라서, CORC[®]에서는 1 피치 길이에 대해 수직방향 자기장 성분의 평균치를 추정하여 수식에 적용할 수 있다.

3.2. 자화손실 측정 결과를 이용한 임계전류의 추정

LPC 측정 영역 내에 포함되는 권선 피치의 비율을 다르게 제작한 여러 CORC[®] 샘플의 경우, 피치의 길이는 다르지만, 사용된 선재는 동일한 선재폭과 가닥 수를 가진다. 따라서, CORC[®] 샘플의 임계전류는 사용한 선재 폭이 동일한 샘플끼리 모두 같은 값의 임계전류를 가져야 한다. 이는 정규화된

자화손실 그래프 상에서 최댓값을 가지는 지점이 모두 동일하게 나타나야 함을 의미한다.

그림 4, 5는 6 mm 폭, 4 mm 폭 선재로 제작한 CORC[®]의 정규화된 자화손실 그래프와, 그래프의 최대 값을 가질 때의 인가 자기장의 값을 표시한 그래프이다. 그래프에서 알 수 있듯이, 하나의 선재 폭으로 제작한 CORC[®]의 손실 그래프는 모두 동일한 자기장에서 최댓값을 가짐을 확인할 수 있다. 또, 6 mm와 4 mm 폭의 선재를 사용하여 제작한 두 경우 모두 0.068 T에서 최대 값을 가짐을 확인하였다. 이는 모든 샘플에서 동일한 임계전류 값을 가짐을 의미한다. 이를 앞서 구한 식 (4)에 대입하여 계산한다면 임계전류 값은 1053 A로 계산된다. 하지만 이 값은 단순히 선재 한 가닥의 임계전류를 가닥 수와 곱한 값보다 22~27[%] 정도 더 작은 값을 나타내고 있다. 이는 자화손실 측정 시 자기장의 측정 간격이 너무 커서 최댓값을 가지는 지점을 정확하게 찾지 못한 결과로 예측하고 있다. 자기장을 더 세밀하게 측정할 경우, CORC[®] 도체의 더 정확한 임계전류 값을 확인할 수 있을 것이다.

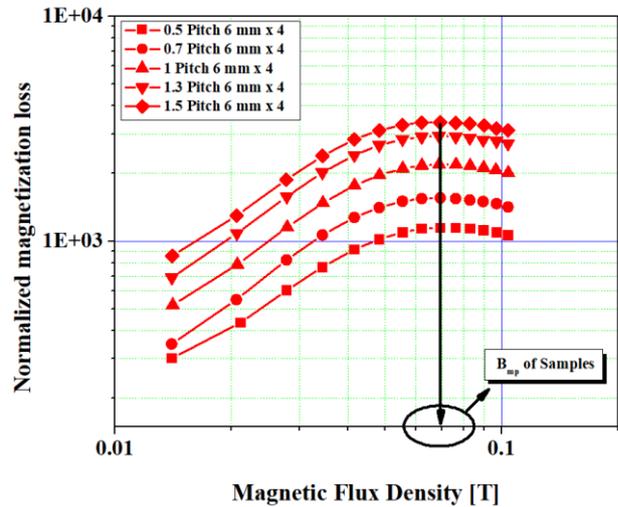


Fig. 4. Normalized magnetization loss measurement result of CORC[®] samples made of 6 mm width tape.

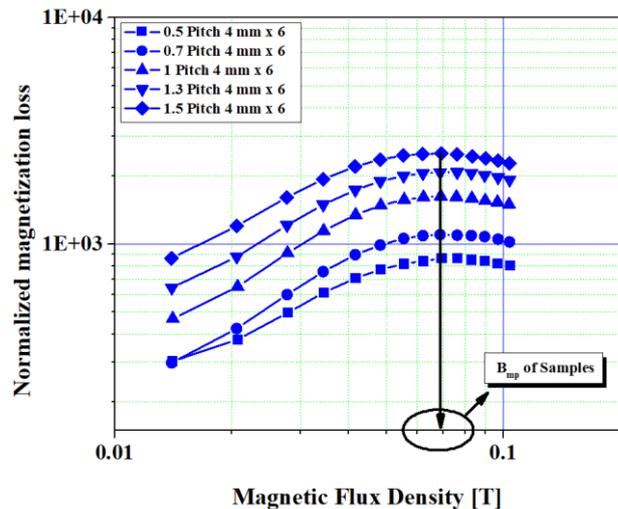


Fig. 5. Normalized magnetization loss measurement result of CORC[®] samples made of 4 mm width tape.

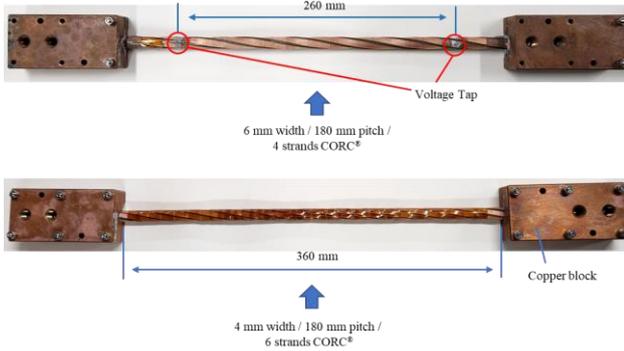


Fig. 6. CORC® Sample for Critical Current Measurement.

4. 임계전류 추정용 대전류 초전도 도체 제작

본 논문에서 자화손실 측정 결과를 이용하여 CORC® 도체에 사용된 선재의 폭과 수가 동일하다면 모두 동일한 임계전류 값을 가지는 것으로 계산되는 것을 확인하였다.

하지만, 위 예측 방법의 정확성에 대한 판단을 위해서는 실제 CORC® 도체의 임계전류의 측정 결과와 비교해야 할 필요가 있다. 따라서, 본 연구진은 CORC® 도체의 임계전류를 측정하기 위한 샘플을 제작 중에 있다. 그림 6은 임계전류 측정을 위한 CORC® 샘플을 나타낸다. 샘플은 구리 터미널에 CORC®를 접합하여 전류를 통전시킬 수 있도록 제작하였으며, CORC® 샘플 중앙부에 병렬 구성된 선재를 감싸는 형태로 전압 탭을 제작하여 모든 선재와 연결시켜 제작하였다. 상기 서술한 자화손실 측정에 사용된 CORC®의 경우, 권선피치를 다양하게 변화시키며 제작하였지만, 사용 선재 수가 모두 동일하기 때문에 모두 같은 임계전류 값을 가지고 있다. CORC®의 임계전류 추정의 정확성을 높이기 위해서는 더 다양한 임계전류를 가지는 CORC® 샘플이 필요하다. 또한, 자기장의 측정 시 더 세밀하게 손실을 측정하여 정규화 된 자기장의 최대지점을 가지는 외부 자기장의 값을 찾아야 한다. 따라서 향후 더 다양한 선재 수를 가지는 CORC® 샘플을 제작하여 손실을 측정한 뒤, 그와 동일한 CORC® 샘플을 사용하여 임계전류를 측정하고 예측된 임계전류의 값과 실제 측정된 임계전류 값을 비교 분석할 예정이다.

5. 결 론

CORC® 도체의 임계전류 측정은 높은 통전 용량을 필요로 하며, 측정을 위해 선재를 손상시킬 위험이 있다. 따라서, 본 연구진은 CORC®의 자화손실을 측정하여 비 파괴, 비 손상적으로 CORC®의 임계전류를 추정하는 방법을 제안하였다. 동일한 선재 폭과 가닥 수를 가지는 다양한 권선

피치의 CORC®를 제작하였고, 자화손실을 측정하여 임계전류를 추정하였다. 이를 통해 동일한 선재 폭과 가닥 수를 가지는 샘플의 경우, 모두 동일한 임계전류를 가지는 것으로 계산되었다. 향후 선재 수를 더 다양하게 변화시켜 서로 다른 임계전류를 가지는 CORC® 샘플을 제작하고, 실제 임계전류를 측정할 예정이다. 이를 활용하여 본 논문에서 제시한 임계전류 추정값과, 실제 임계전류 측정 결과를 비교 분석하여 상기 서술한 예측 방법에 대한 정확성을 검증할 예정이다.

ACKNOWLEDGMENT

“ This research was supported by National R&D Program through the National Research Foundation of Korea(NRF) funded by Ministry of Science and ICT (2022M3I9A1076800)”, “This research was supported by Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea(NRF) funded by the Ministry of Science and ICT (2021R1F1A1063208)”

REFERENCES

- [1] M. Takayasu, et al., “Cabling Method for High Current Conductors Made of HTS Tapes,” *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 21, 2011.
- [2] Walter H. Fietz, Michael J. Wolf, Alan Preuss, Reinhard Heller, and Klaus-Peter Weiss, “High-Current HTS Cables: Status and Actual Development,” *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 26, 2016.
- [3] Makoto Takayasu, et al., “Investigation of HTS Twisted Stacked-Tape Cable (TSTC) Conductor for High-Field, High-Current Fusion Magnets,” *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 27, Issue. 4, 2017
- [4] Jeremy D Weiss, et al., “Introduction of CORC® wires: highly flexible, round high-temperature superconducting wires for magnet and power transmission applications,” *Supercond. Sci. Technol.*, vol. 30, no. 1, pp. 014002, 2017.
- [5] D C Van Der Laan, et al., “A CORC® cable insert solenoid: the first high-temperature superconducting insert magnet tested at currents exceeding 4 kA in 14 T background magnetic field,” *Supercond. Sci. Technol.*, vol. 33, no. 5, pp. 05LT03, 2020.
- [6] Xiaorong Wang, et al., “Development and performance of a 2.9 Tesla dipole magnet using high-temperature superconducting CORC® wires,” *Supercond. Sci. Technol.*, vol. 34, no. 1, pp. 015012, 2021.
- [7] J. -K. Lee, Y. Kim, S. Lee, W. -S. Kim, C. Park and K. Choi, “Estimation of the Critical Current Density From the Measured Values of Perpendicular Magnetization Losses in HTS Coated Conductors,” *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 21, no. 3, pp. 2345-2348, 2011.
- [8] Z. Jiang and N. Amemiya, “An experimental method for total AC loss measurement of high Tc superconductors,” *Supercond. Sci. Technol.*, vol. 17, no. 3, pp. 371-379, 2004.
- [9] E. H. Brandt, “Type-II-superconductor strip with current in a perpendicular magnetic field,” *Physical review B*, vol.48, Issue 17, 1993.