

Measurement of magnetization loss according to the winding pitch of CORC®

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

^a Korea Polytechnic University, Gyeonggi-do, Korea

^b Woosuk University, Jeollabuk-do, Korea

(Received 8 November 2021; revised or reviewed 22 December 2021; accepted 23 December 2021)

Abstract

For the application of HTS wire to AC power equipment, a conductor with high current capacity and low loss is required. CORC®, one of the high-current conductors manufactured using several HTS wires, is made by winding the wires in a spiral on a cylindrical former. Because the magnetization loss of a CORC® conductor depends on the degree of magnetic coupling between the wires constituting the CORC®, it is necessary to know the value of the magnetization loss of the CORC® itself. In order to obtain an accurate loss value, it is necessary to know the effect of the ratio of the winding pitch of the CORC® conductor in the pickup coil region sampling the magnetization loss signal. To confirm this effect, we prepare CORC® samples having various winding pitches, and measure and compare the magnetization losses. In addition, the magnetization loss was measured while rotating the CORC® samples and it was examined whether there was a difference in the magnetization loss according to the rotation.

Keywords: CORC, magnetization loss, AC loss, HTS

1. 서 론

초전도체는 저항이 발생하지 않는 특성을 가지기 때문에 손실 없이 높은 전류를 흘릴 수 있으므로 여러 전력기에 응용하기 위한 연구가 진행되고 있다. 그러나, 변압기 및 회전기 등 교류 전력기기에의 응용은 아직 상용화 단계의 연구까지는 진행되지 못하고 있는데, 이는 초전도체의 반자성 특성에 의한 히스테리시스 현상으로 인해 교류손실이 발생하기 때문이다.

초전도 선재의 교류손실은 얇은 판 모양의 초전도체에 수직 방향으로 인가되는 교류 자기장에 의해 주로 발생한다. 초전도 선재를 교류 전력기에 응용하기 위해서는 여러 가닥의 초전도 선재를 사용하여 대용량의 전류를 흘릴 수 있는 도체를 제작하여야 한다. 도체의 교류손실을 줄이기 위해서는 초전도 선재의 넓은 면에 수직 방향으로 인가되는 자기장을 줄여야 하고, 선재들 사이의 자기적 결합을 감소시켜야 한다. 또, 선재의 폭을 감소시키는 것으로도 교류손실을 감소시키는 것이 가능하다. 결과적으로 고온 초전도 선재의 폭을 줄이기 위해 분할되어야 하고, 자기적 결합을 감소시키기 위해서 트위스트 시켜야 한다. [1-3] 현재 이러한 특성을 반영하고, 높은 전류 용량을 가지는 초전도 케이블로 Conductor on round core (CORC®), Twisted stack tape cable (TSTC), Robel assembled coated conductor (RACC) 등에 대한 연구가 해외에서 진행되고 있다. [4-7] 이 중 CORC® 도체는 선재의 분할에 의한 손실 감소 효과가 뚜렷하고, 제작이 용이한 특징이 있다. [8, 9] CORC®는 비자성체, 부도체인 원통형 포머(former)에 초전도 선재를 나선형으로 권선하여 선재를 트위스트 시키는 효과를 갖도록 제작한다. 하나의 포머에 원주방향을 따라 여러 가닥의 초전도 선재를 배치하여 제작할 경우 각 선재마다 동일한 형상으로

제작되므로 각 선재의 인덕턴스가 동일하게 되고 균등한 전류 분배 특성을 가지게 된다.

CORC®를 교류 기기에 적용하기 위해 CORC® 코일을 제작할 경우, 이 CORC® 코일에서 발생하는 교류손실을 예측할 수 있어야 한다. 이를 위해서는 CORC® 도체에서 발생하는 교류 손실에 대한 정확한 분석이 가능해야 한다. 본 연구에서는 CORC® 도체의 자화손실을 샘플링 할 수 있는 측정 영역과 CORC®의 포머에 나선형으로 권선된 초전도 선재의 권선 피치의 길이에 따른 손실 값의 상관관계가 있는지 확인하였다. 또한, CORC® 샘플에 인가되는 교류자기장의 방향에 따른 자화손실의 변화를 알아보았다.

2. CORC® 샘플의 형상

CORC®는 원통형 포머의 원주 방향을 따라 선재를 동일한 간격으로 배치하고, 각 선재를 나선형으로 권선하여 제작된다. 따라서 포머의 지름, 포머의 길이, 선재의 권선 피치, 선재 폭 및 개수에 따라 다양한 형상의 CORC®를 제작하는 것이 가능하다. 본 논문에서는 선재의 권선 피치의 변화에 따른 자화 손실의 차이를 확인하기 위해서 권선 피치 이외의 조건을 동일하게 두어서 제작하였다. 초전도 선재들 특정 조건을 넘어서는 형태로 제작하게 되면 CORC® 샘플의 임계전류가 감소하는 현상이 발생하는데 이는 선재의 굽힘 정도에 따른 영향으로 인해 선재가 손상되어 발생된다. 포머의 직경이 8 [mm], 10 [mm]인 경우에 포머에 권선한 선재의 굽힘 정도에 의한 임계전류 측정값은 Fig. 1과 같다. Fig. 1에서 보는 바와 같이 권선시 임계전류 감소가 발생하지 않기 위해서 직경 10 [mm] 포머를 사용하고, 60 [mm] 이상의 권선 피치를 가지는 CORC® 샘플을 제작하였다. CORC® 샘플의 포머는 자화 손실 측정 시 발생할 수 있는 와전류에 의한 영향을 없애기 위해 Fiber-Reinforced Plastic (FRP)를

* Corresponding author: jikwang@woosuk.ac.kr

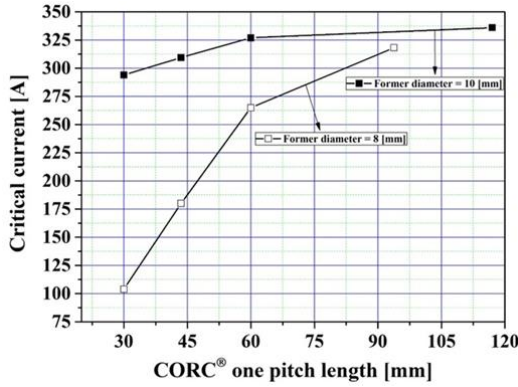


Fig. 1. Critical current of CORC® according to the diameter and pitch length of the former.

TABLE I
SPECIFICATION OF THE HTS WIRE.

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

[mm]의 전체 폭을 가질 수 있도록 6 [mm] 선재는 4개, 4 [mm] 선재는 6개를 사용하여 병렬 배치하였다. 각 선재는 원통 포머의 축을 기준으로 축대칭의 형태로 제작하였으며, 각 선재는 서로 전기적으로 연결되지 않고 독립적으로 위치하고 있다. CORC® 샘플의 길이는 180[mm]이고, 자화손실을 측정하는 영역은 샘플의 중앙부분 90 [mm]이다. CORC® 샘플의 권선 피치는 Fig. 2에서 보이는 바와 같이 측정 영역 90 [mm] 내에 권선 피치의 비율이 0.5, 0.7, 1, 1.3, 1.5 피치가 되도록 제작하였다. 따라서 각 샘플들의 권선 피치는 180 [mm], 128.57 [mm], 90 [mm], 69.23 [mm], 60 [mm] 이다. 5가지의 권선 피치에 대해 4 [mm], 6 [mm] 폭을 가지는 선재를 사용하여 총 10개의 샘플을 제작하였고, 샘플 리스트와 사양은 Table II에, 전체 샘플 사진은 Fig. 3에 나타냈다. 샘플의 측정 영역은 end effect의 영향을 줄이기 위해서 샘플의 정 중앙에 위치시켰다.

TABLE II
SPECIFICATION OF THE CORC® SAMPLES.

One Pitch length [mm]	Pitch ratio in the measured length	Width of wire [mm]	Number of wires	Sample classification
180	0.5	6	4	0.5 pitch 6 mm X 4
		4	6	0.5 pitch 4 mm X 6
128.57	0.7	6	4	0.7 pitch 6 mm X 4
		4	6	0.7 pitch 4 mm X 6
90	1	6	4	1 pitch 6 mm X 4
		4	6	1 pitch 4 mm X 6
69.23	1.3	6	4	1.3 pitch 6 mm X 4
		4	6	1.3 pitch 4 mm X 6
60	1.5	6	4	1.5 pitch 6 mm X 4
		4	6	1.5 pitch 4 mm X 6

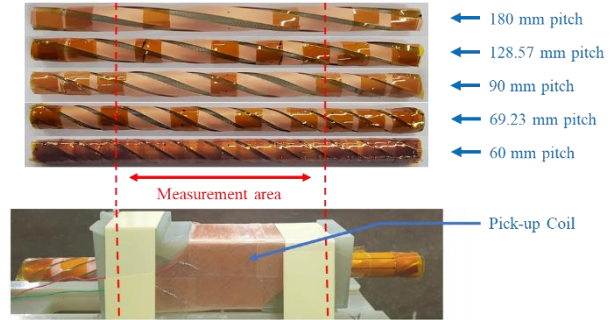
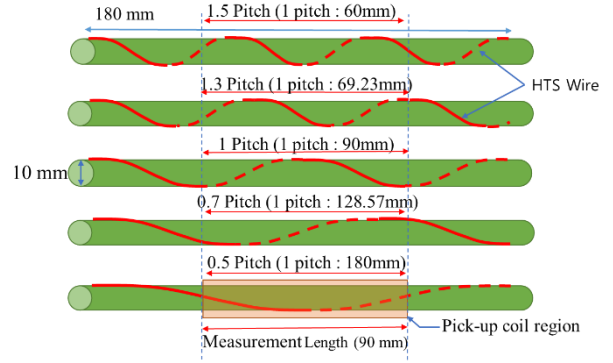


Fig. 2. CORC® samples with different winding pitches in the measuring area.

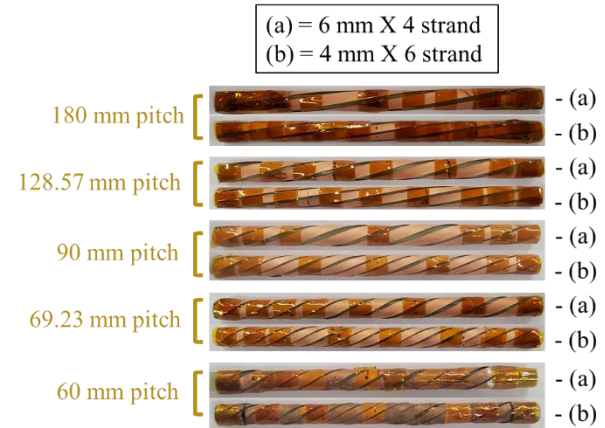


Fig. 3. CORC® Samples used in the experiment.

3. 자화 손실 측정 시스템 및 측정 방법

자화 손실의 측정을 위한 장치로는 Linked pick-up coil (LPC)을 사용하였다.[10] LPC는 픽업 코일과 캔슬 코일로 구성되어 있고 LPC 내부에 샘플을 위치시키고 외부에 교류 자기장을 인가하여 샘플에 발생하는 자화손실을 픽업 코일로 샘플링 하는 방식으로 사용한다. 픽업코일이 샘플의 손실 신호를 측정하게 되면, 캔슬 코일이 인가된 외부 교류 자기장으로 인해 발생하는 유도전압을 상쇄시켜 샘플에서 발생하는 손실 신호만을 얻을 수 있다. 따라서, 픽업 코일과 캔슬 코일은 서로 역 결선 되어 있다. 각 코일은 80 [μm] 직경의 구리선 1538 턴으로 구성되어 있으며, 2 층으로 권선하였다. 한 턴의 면적은 30 [mm] X 30 [mm]이다.

CORC® 샘플 및 LPC에 균일한 교류 자기장을 인가하기 위해서 새들(Saddle) 형식의 마그넷을 사용하였다. 외부 마그넷의 중심부의 폭 방향 ±15mm, 길이방향 ±200 mm,

높이방향 ±30 mm 영역에서 외부 자석의 길이방향 자장 균일도는 99%이다. 자기장 균일도는 Fig. 4에 나타냈다[11]. 그래프의 y는 외부 마그넷의 중심을 기준으로 폭 방향을 나타내며, z는 외부 자기장의 높이방향을 나타낸다. LPC 측정 영역 내 샘플은 외부 마그넷 중심에서 길이방향 200 mm 이내에 위치하고 있기 때문에 균일한 교류 자기장을 샘플에 인가할 수 있다. Fig. 5는 전체적인 자화손실 측정 시스템의 사진을 나타냈다.

자화손실 측정을 위해서 외부 마그넷에 전류를 5 [A] 단위로 증가시키며 75 [A]까지 통전하여 최대 0.1 [T]의 자기장을 CORC® 샘플과 LPC 코일에 인가하였다. 샘플에서 측정된 자화손실을 픽업 코일 측정 영역 내의 초전도 선재의 부피로 나누어 손실 밀도로 계산하였다.

LPC 측정 영역 내에 CORC®의 권선 피치가 정수 배일 경우, CORC® 샘플을 포머의 원주 방향을 따라 회전시키는 것과 상관없이 항상 측정 영역 내에선 권선 피치가 정수 배의 피치로 유지된다. 하지만, 측정 영역 내의 CORC® 샘플의 권선 피치가 정수 배가 아닌 비율을 가질 경우, 샘플을 회전시키는 각도에 따라 측정 영역 내의 CORC® 샘플의 형상이 일정하게 유지되지 않는다. 이러한 경우에, 샘플을 회전시킬 경우 측정 영역 내의 CORC® 샘플이 경험하게 되는 교류 자기장이 달라지게 된다. 즉, 샘플에 인가하는 자장의 인가 각도가 달라지게 된다는 것을 의미한다. 따라서 샘플의 회전으로 인해 자화 손실의 측정 결과가 달라지게 된다면, 측정 영역과 권선 피치가 정수 배를 가진 비율이어야 한다는 제약이 발생하게 된다. 이를 확인하기 위해서 각 CORC® 샘플을 Fig. 6과 같이 포머의 원주 방향을 따라 0°에서 180°까지 45°씩 회전시키며 자화손실을 측정하였다.

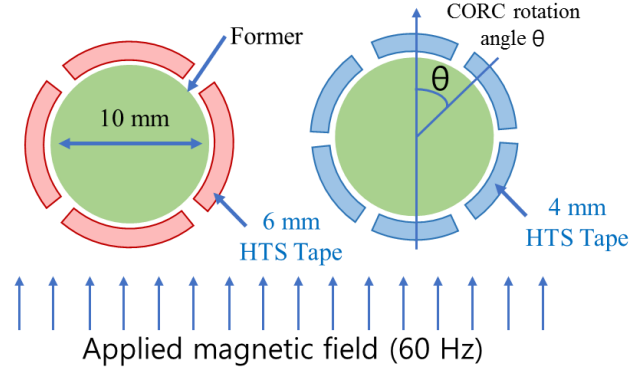


Fig. 6. External magnetic field and rotation angle of the CORC® sample.

4. CORC® 샘플의 자화 손실 측정 결과

4.1. 회전에 따른 자화손실 측정 결과 비교

권선 피치를 변화시켜 제작한 CORC® 샘플을 각각 회전시켜 가며 자화 손실을 측정하였다. Fig. 7 ~ Fig. 11은 각 권선 피치별 6 [mm] 선재, 4 [mm] 선재를 사용한 샘플들의 회전에 따른 자화 손실 측정 결과를 (1)과 같이 정규화된 손실값으로 나타냈다. B_m 은 도체에 인가되는 60[Hz] 교류자계의 최대값이며, μ_0 는 진공의 투자율로 $4\pi \times 10^{-7}$ 의 값을 가진다.

$$\text{Normalized magnetization loss} = \frac{\text{Measured loss}}{B_m^2/2\mu_0} \quad (1)$$

측정 결과에서 낮은 자기장이 인가될 경우와 높은 자기장이 인가될 경우의 손실 그래프의 기울기가 달라지는 것을 알 수 있다. 이는 고온 초전도체에서 발생하는 자화손실은 외부 인가 자기장의 완전침투가 이루어지는 자기장(완전침투 자기장)를 기준으로 손실의 발생 패턴이 달라지므로, 자화손실 자체가 감소되어지는 것이 아닌, 자화손실의 증가율이 감소되어짐을 나타내는 결과이다. 측정 결과를 보면 선재 폭이 작은 4 [mm] 선재로 제작한 샘플이 더 작은 손실 값을 가지는 것을 확인할 수 있다. 총 선재의 폭이 동일하지만, 선재의 폭을 줄이고 개수를 늘리는

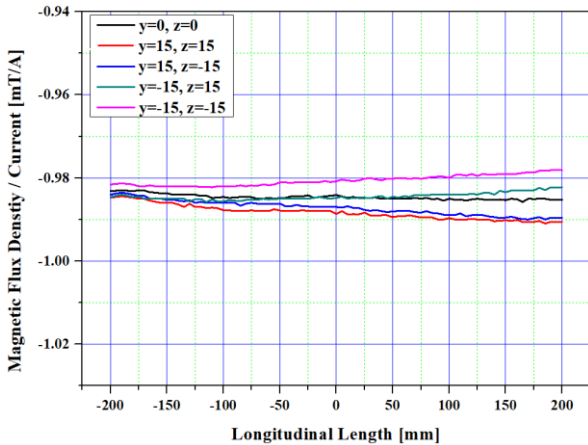


Fig. 4. Longitudinal magnetic field uniformity of external magnet.

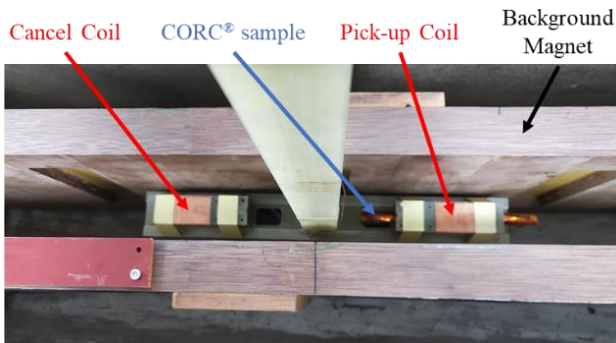


Fig. 5. Magnetization Loss Measurement System.

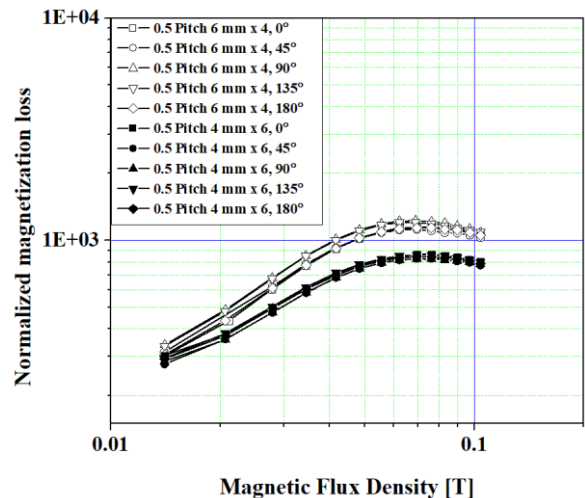


Fig. 7. Measurement result of magnetization loss according to rotation of CORC® sample with 0.5 winding pitch ratio.

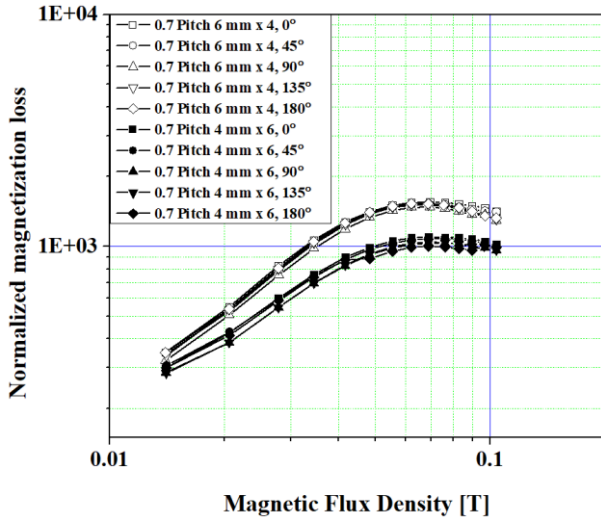


Fig. 8. Measurement result of magnetization loss according to rotation of CORC® sample with 0.7 winding pitch ratio.

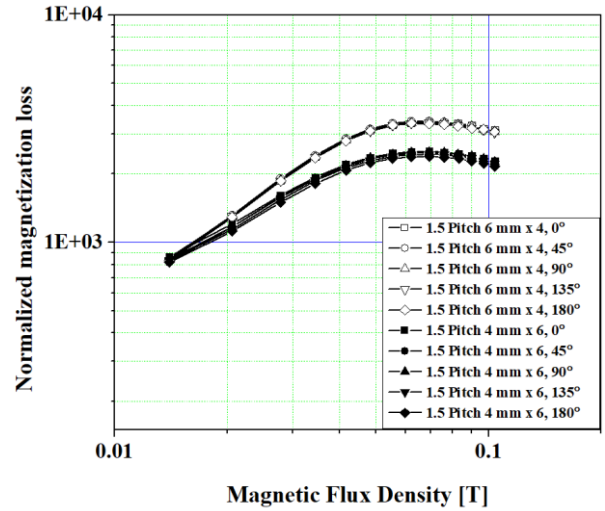


Fig. 11. Measurement result of magnetization loss according to rotation of CORC® sample with 1.5 winding pitch ratio.

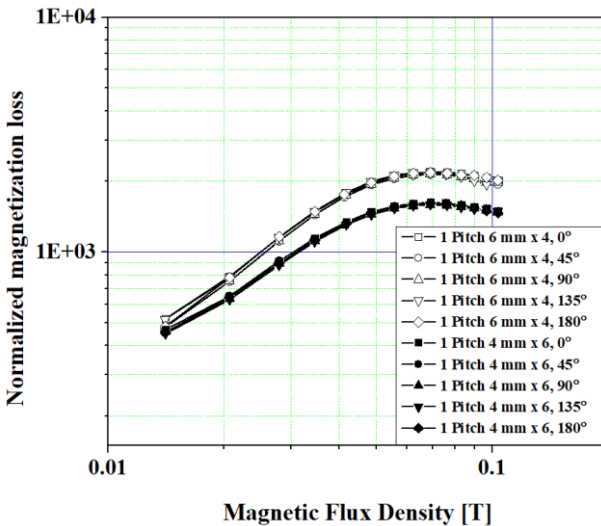


Fig. 9. Measurement result of magnetization loss according to rotation of CORC® sample with 1 winding pitch ratio.

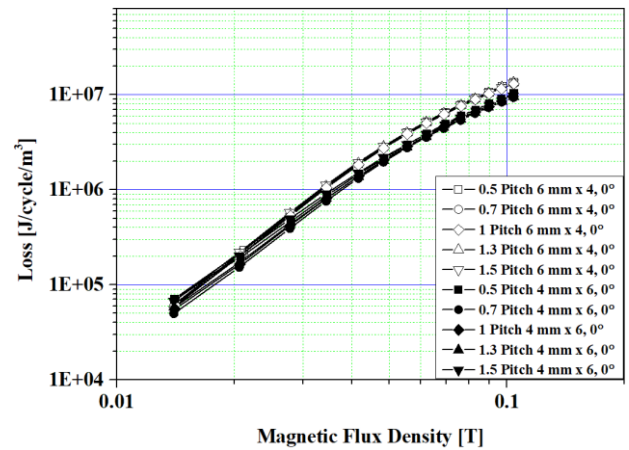


Fig. 12. Measurement result of magnetization loss according to winding pitch of CORC®.

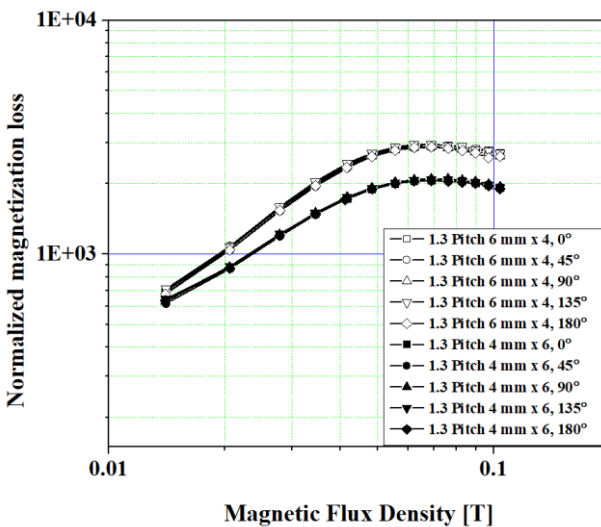


Fig. 10. Measurement result of magnetization loss according to rotation of CORC® sample with 1.3 winding pitch ratio.

4.2. 권선 피치에 따른 자화 손실 측정 결과 비교

Fig. 12는 권선 피치를 변화시키며 CORC® 샘플의 자화 손실 측정 결과를 하나의 그래프로 비교한 결과이다. 각 샘플은 회전 각도 0° 에서 측정된 데이터를 기준으로 하며, 각각 6 [mm] 선재 및 4 [mm] 선재로 제작한 샘플을 한 그래프에 표시하였다. 손실 측정 결과로 권선피치가 다르더라도 손실 밀도가 전부 동일한 값을 나타낼 수 있다. 이는 외부 마그넷이 만들어내는 교류 자기장과 CORC® 샘플의 형상이 손실에 미치는 영향은 LPC 측정 영역 내에만 국한되지 않으며, 동일한 포머 길이에 권선 피치를 변화시켜 서로 다른 길이의 CORC® 를 제작하여 자화 손실을 측정하여도 이를 각각 측정 영역의 CORC® 부피로 나눈 손실 밀도 값으로 환산한다면 전부 동일한 손실을 나타낸다는 결과를 알 수 있다. 이로 인해 CORC® 샘플의 제작 시, 샘플의 권선피치를 측정 영역에 따른 제한 없이 자유롭게 결정할 수 있다.

5. 결론

CORC® 코일의 해석을 위해서는 CORC® 샘플의 정확한

측정이 필요하다. 또한 이 측정 결과가 권선 피치 및 샘플의 회전에 따라 차이가 발생해서는 안된다. 따라서 본 연구진은 CORC® 샘플의 6 [mm], 4 [mm]의 두가지 폭을 가지는 초전도 선재를 사용하여 CORC® 샘플을 제작하였다. 각 CORC® 샘플은 LPC 측정 영역 내 0.5, 0.7, 1, 1.3, 1.5의 비율을 가지는 권선 피치로 제작하였고, 제작된 CORC® 샘플을 회전시켜 인가 자장 각도를 변화시키며 자화 손실을 측정하였다. 같은 총 선재폭을 가지고 있음에도 불구하고 선재 폭을 작게 하고 선재 개수를 증가시킬 경우 선재를 분할한 경우와 동일한 효과로 손실이 감소함을 확인하였고, 권선 피치 변화 및 CORC® 샘플 회전과 관계없이 모두 동일한 손실이 발생함을 확인하였다.

ACKNOWLEDGMENT

“This research was supported by Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea(NRF) funded by the Ministry of Education(2019R111A3A01063158)“

“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] F. Grilli, A. Kario, “How filaments can reduce AC losses in HTS coated conductors: A review,” *Supercond. Sci. Technol.*, vol. 29, no. 8, Jul. 2016, Art. no. 083002.
- [2] J. Šouc, et al., “Low AC loss cable produced from transposed striated CC tapes,” *Supercond. Sci. Technol.*, vol. 26, no. 7, Jun. 2013.
- [3] J.-K. Lee et al., “AC loss analysis of striated HTS compact cables for low loss cable design,” *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 23, no. 3, Jan. 2013, Art. no. 5900804.
- [4] N. Glasson et al., “Test results and conclusions from a 1 MVA superconducting transformer featuring 2G HTS Roebel cable,” *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 29, no. 4, Jun. 2017, Art. no. 5500205.
- [5] E. Pardo et al., “Ac loss modelling and measurement of superconducting transformers with coated-conductor Roebel-cable in lowvoltage winding,” *Supercond. Sci. Technol.*, vol. 28, no. 11, Oct. 2015, Art. no. 114008.
- [6] W. Goldacker et al., “Roebel cables from REBCO coated conductors: A one-century-old concept for the superconductivity of the future,” *Supercond. Sci. Technol.*, vol. 27, no. 9, Aug. 2014, Art. no. 093001.
- [7] J. 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, Jan. 2017, Art. no. 014002.
- [8] J. Goo et al., “Magnetization loss estimation of HTS solenoid coils wound with CORC,” *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 30, no. 4, Jun. 2020, Art. no. 4704007.
- [9] M. Vojenciak et al., “Magnetization ac loss reduction in HTS CORC cables made of striated coated conductors,” *Supercond. Sci. Technol.*, vol. 28, no. 10, Sep. 2015.
- [10] 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, Mar. 2004.
- [11] J. Goo, J. -W. Han, S. Lee, W. -S. Kim, K. Choi and J. -K. Lee, “Magnetization Loss of CORC With Various Configurations of 2G HTS Strands,” in *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 31, no. 5, pp. 1-5, Aug. 2021, Art no. 5901205