

# Experimental study on the correlation between measurement length and winding or twist pitch for magnetization loss occurring in CORC and TSTC

Ji-Kwang Lee<sup>a</sup>, Jinwoo Han<sup>b</sup>, Kyeongdal Choi<sup>c</sup>, and Woo-Seok Kim<sup>c,\*</sup>

<sup>a</sup> Woosuk University, Jeollabuk-do, Korea

<sup>b</sup> pmlab, Gyeonggi-do, Korea

<sup>c</sup> Tech University of Korea, Gyeonggi-do, Korea

(Received 4 December 2023; revised or reviewed 22 December 2023; accepted 23 December 2023)

## Abstract

For high-temperature superconducting power applications that need large current capacity, a large current conductor manufactured using multiple superconducting tape is required. Conductors being studied for large currents capacity such as CORC, TSTC, and RACC have advantages and disadvantages, and in order to use these conductors in coil form and apply them to AC power devices, research on magnetization loss occurring in superconductors due to external magnetic fields is essential. To accurately measure magnetization loss in a conductor that is twisted by stacking straight conductors like TSTC, the correlation between the measuring system and the shape of the sample must be clearly known to accurately measure the loss. In this paper, we will confirm the difference in magnetization loss measurement values according to the correlation between the length of the pickup coil and the twist pitch of the sample in CORC and TSTC shapes, and review considerations for accurate magnetization loss measurement from the results.

**Keywords:** large current conductor, CORC, TSTC, external magnetic field, magnetization loss, twist pitch

## 1. 서 론

대전류용 초전도 도체는 전류 용량을 늘리고 선재간의 균등한 전류분류를 위하여 다수의 초전도 선재를 전위하거나 꼬아서 제작한다. 이러한 도체의 대표적인 형태로 RACC(Roebel Assembled Coated Conductor), CORC(Conductor On Round Core), TSTC(Twisted Stacked Tape Cable)를 들 수 있다[1-2]. RACC는 전위(Transposition) 형태를 갖는 도체의 대표적인 형상을, CORC와 TSTC는 꼬임(Twist) 형태를 갖는 대표적인 형상을 나타낸다[3-5]. CORC는 포머 위로 나선형 구조의 권선에 의한, TSTC는 자체의 뒤틀림에 의한 반복적인 회전 형상을 갖는다. 꼬임 및 회전은 1 피치의 형태가 주기적으로 반복되는 형상으로 구성되고, 1 피치 내의 형상은 길이 방향을 축으로 하여 회전시켜도 동일한 구조 및 바라보는 각도에 따른 동일한 단면적이 반복적으로 나타나게 된다.

이러한 특징은 초전도 교류손실 측면에서 자화손실의 크기와 밀접한 연관성을 가지게 된다. 초전도 선재에서 발생하는 자화손실은 외부에서 인가되는 교번 자기장 중에서 선재의 넓은 면에 수직한 방향으로 작용하는 자기장 성분의 크기와 연관성을 가진다[6-8]. CORC 및 TSTC의 1 피치 동안의 형상은 도체의 길이 방향을 축으로 하여 축과 수직한 방향에서 인가되는 자기장에 대해 일정한 패턴이 반복되는 동일한 형상을 가진다. 이는 자화손실 측정 시 임의의 방향의 외부 인가 자기장에 대해 모두 동일한 손실이 측정된다고

생각할 수 있다. 그러나, 측정되는 샘플의 길이가 샘플의 피치의 정수배가 아닐 경우에는 도체가 경험하는 외부 수직 자기장의 크기가 달라진다. 또한, CORC는 포머위에 도체를 구성하는 각 선재들이 대칭적으로 구성되지만 TSTC는 선재 자체의 꼬임만을 가지므로 두 도체간의 형상 차이에 의한 영향이 존재한다. 따라서, 정확한 자화손실 측정을 위해서는 측정하는 샘플영역과 사용된 샘플형상 사이의 상관관계를 명확하게 알아야 한다. 본 논문에서는 CORC 및 TSTC의 피치와 측정 영역 사이의 관계를 확인하기 위해 다양한 샘플의 자화손실을 측정하여 비교 분석하였다.

## 2. 자화손실 측정 시스템

자화손실 측정을 위해 본 연구에서는 2004년에 지양(Z. Jiang)과 아메미야(N. Amemiya)가 제안한 LPC(Linked Pick-up Coil)시스템을 사용하였다[9]. LPC 시스템은 외부 마그넷과 픽업(Pick-up) 코일 및 캔슬(Cancel) 코일로 구성되어 있다. 외부 교류 자기장이 인가될 때 픽업 코일 내부에 위치한 샘플에서 발생하는 전압을 샘플링하여 측정하는 방법이다. 본 연구에 사용된 LPC 시스템은 새들(Saddle) 형태의 외부 자장 인가용 마그넷의 중심에 픽업 코일과 캔슬 코일이 배치된다. 측정회로도와 LPC 등 측정시스템을 그림 1에 나타냈으며, 픽업 코일과 샘플의 배치 형상을 그림 2에 나타냈다. 픽업 코일 및 캔슬 코일은 동일한 사양과 형상이며, 80  $\mu\text{m}$  직경의 구리선 1538 턴을 두 층으로 하여 권선하였고, 한 턴의 면적은 30 mm X 30 mm 이다. 캔슬

\*Corresponding author: [wskim@tukorea.ac.kr](mailto:wskim@tukorea.ac.kr)

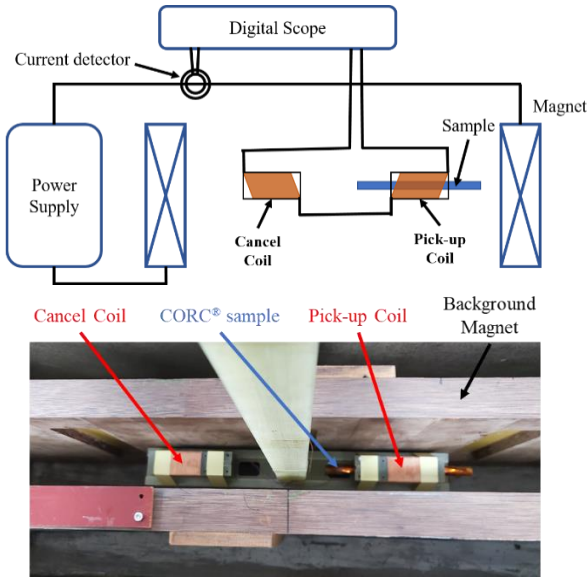


Fig. 1. Schematic configuration of measurement system.

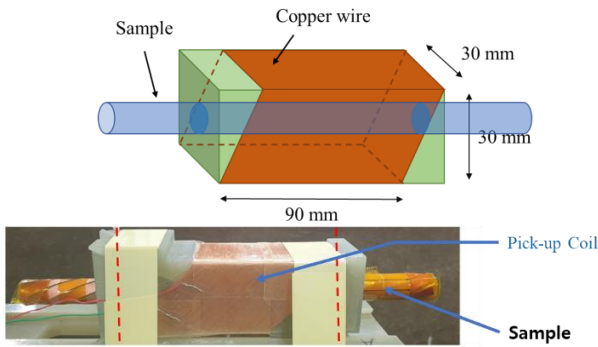


Fig. 2. Pick-up coil and sample shape.

코일은 외부 자기장으로 인해 픽업 코일에 유도되는 유도성 전압을 상쇄시키기 위해 픽업 코일과 역결선 한다. 외부 마그넷은 샘플에 교류 자기장을 인가하며 샘플이 위치하는 측정 영역에서 마그넷의 길이 방향 자장 균일도는 99% 이다. 외부 마그넷에 60 Hz 교류전류를 10 A 에서 75 A 까지 5 A 단위로 통전하여 샘플에 최대 0.1 T 의 교류 자기장을 인가하며 자화손실을 측정하였다. 자화손실의 측정을 위해 샘플을 픽업코일의 중심에 배치하며 샘플의 손실 측정영역은 LPC의 픽업코일 내부 영역이 된다. 동일한 측정 영역 내의 샘플은 샘플의 원주 방향을 따라 회전시킬 경우 샘플의 형상이 대칭적이거나 균등한 정사영 면적을 가지지 않는다면 자기장을 경험하는 면적이 달라질 수 있다. 초전도 선재의 넓은 면에 수직인 방향으로 인가되는 자기장이 자화손실에 큰 영향을 미치므로 이러한 면적의 차이는 손실 측정결과의 차이로 나타나게 된다. 따라서, 이러한 자화손실 측정영역과 샘플의 형상 및 회전 등에 따른 손실 차이를 정확하게 알 수 있어야만 손실의 정확한 측정이 가능하다.

### 3. 자화손실 측정에 사용된 샘플의 형상

자화손실 측정에 사용된 2세대 고온초전도 선재는 SuNAM 사의 구리 안정화 층을 가지는 6 mm, 4 mm 폭의 선재이다.

임계전류는 6 mm 폭 선재가 400 A, 4 mm 폭 선재가 185 A 이며, 자세한 선재의 사양은 표 1에 나타났다. CORC, TSTC 각각의 형상은 그림 3와 그림 4에, 제작된 샘플의 형상은 그림 5에 보여준다.

#### 3.1. CORC 샘플의 형상

CORC는 원통형 포머를 기준으로 테이프형 초전도 선재를 나선형으로 권선하는 형태를 가진다. 따라서, 포머의 형태, 선재의 재원, 권선 피치 등에 따라 형상이 달라진다. 본 연구진은 CORC의 형상에 따른 다양한 손실 패턴에 대한 선행 연구들을 진행하였고, 이를 통해 임계전류의 감소가 없는 포머의 사이즈 및 권선 피치의 값을 확인하였다. 포머에 하나의 초전도 선재를 권선하는 경우나 여러 가닥의 선재를 비대칭적으로 한 영역에 모아서 권선하는 경우에는 픽업코일 길이의 정수배로 권선피치를 구성하여야 정확한 자화손실을 측정할 수 있다. 그러나, 일반적인 CORC는 포머 위에 여러 가닥의 선재가 대칭적으로 위치하기 때문에, 선재의 권선 피치와 관계없이 샘플을 원주 방향을 따라 회전시키더라도 모두 동일한 손실을 나타내는 것을 확인하였다. 따라서 CORC의 경우에는 손실을 측정하는 과정에서 선재의 회전 및 권선 피치와 측정하는 픽업코일의 영역을 자유롭게 선정할 수 있다는 장점을 가진다. 본 논문에서는 TSTC와 CORC를

TABLE I  
SPECIFICATION OF THE HTS WIRE.

Specification	Value
Manufacturer	SuNAM
Stabilizer	Copper
Thickness	0.15 [mm]
Thickness of superconducting layer	1 [ $\mu$ m]
Critical Current	6 [mm] width @77K, 400 [A]
	4 [mm] width @77K, 185 [A]

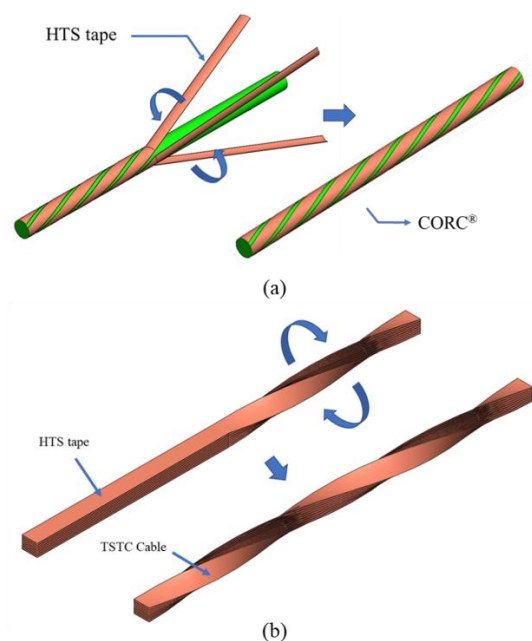


Fig. 3. Magnetization loss measurement sample (a) CORC cable shape, (b) TSTC cable shape.

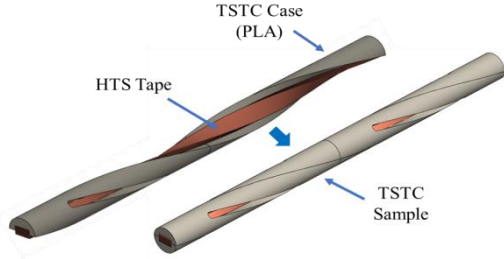


Fig. 4. TSTC Sample shape and detail view.

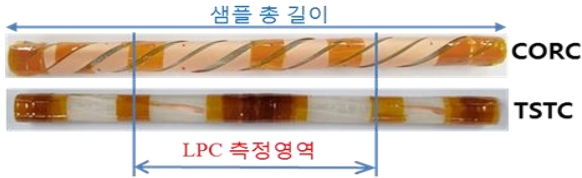


Fig. 5. CORC and TSTC sample shapes.

비교하기 위해 동일한 선재를 사용하여 각각의 샘플을 제작하였다. CORC 포머는 FRP(Fiber Reinforced Plastic)를 사용하여 직경 10 mm, 길이 180 mm로 제작하였다. 도체의 회전에 따른 손실의 차이를 확인하기 위해 사용한 선재의 수 및 권선피치를 변화시키며 손실을 측정하였다.

### 3.2. TSTC 샘플의 형상

TSTC는 테이프형 고온 초전도 선재를 적층하여 길이 방향을 따라 회전시켜 제작한다. CORC와 달리 TSTC는 중심을 기준으로 선재들이 동일한 형상을 가지지 않기 때문에 회전에 따라서 TSTC가 경험하는 자기장이 달라질 수 있다. 따라서, TSTC의 회전 피치와 샘플 자체의 회전 등의 요소들과 측정 영역사이의 관계를 알아야 정확한 손실의 측정이 가능하다. 본 연구진은 CORC의 권선피치와 동일한 꼬임피치를 갖는 TSTC 샘플을 제작하고 샘플을 회전시키며 자화손실을 측정하였다. TSTC 샘플의 기하학적인 꼬임 형상을 유지하기 위해서 틀을 제작하고 틀 내부에 TSTC 형상으로 홈을 만들어 적층된 TSTC도체를 삽입함으로써 샘플을 제작하였다. 자세한 샘플의 형상은 그림 5에 나타났다. TSTC틀은 3D 프린터를 이용하여 PLA 재질로 제작하였다. 틀내에 삽입된 도체와 냉매인 액체질소와의 접촉을 용이하게 하기 위해 액체질소 통로가 되는 홈을 가지는 형태로 4개의 조각 케이스를 제작하여 틀 형태로 조립하고, Kepton 테이프를 사용하여 고정하였다.

## 4. 자화손실 측정 및 분석

LPC 측정 영역은 90 mm 이며 이 측정 영역 내에 피치가 전부 포함되지 않을 경우 자화손실 측정값에 차이가 발생할 수 있다. 이를 확인하기 위해 180 mm 피치를 가지는 CORC와 TSTC 샘플을 제작하여 자화손실을 측정하였다. 각각의 선재가 대칭되어 구성될 경우에 손실에 주는 영향을 확인하기 위해 6 mm 폭 선재 1가닥으로 구성된 샘플과 4가닥으로 구성된 CORC 샘플을 제작하여 손실을 측정하였다. 또한,

TABLE II  
SPECIFICATION OF THE CORC® SAMPLES.

One Pitch length [mm]	Sample type	Number of strands	Sample classification (Sample type / Tape width / Pitch ratio / Number of tapes)
180	CORC	1	CORC / 6 mm / 0.5 pitch / 1 strand
		4	CORC / 6 mm / 0.5 pitch / 4 strands
90	TSTC	1	TSTC / 4 mm / 1 pitch / 1 strand
		2	TSTC / 4 mm / 1 pitch / 2 strands
		4	TSTC / 4 mm / 1 pitch / 4 strands
		6	TSTC / 4 mm / 1 pitch / 6 strands

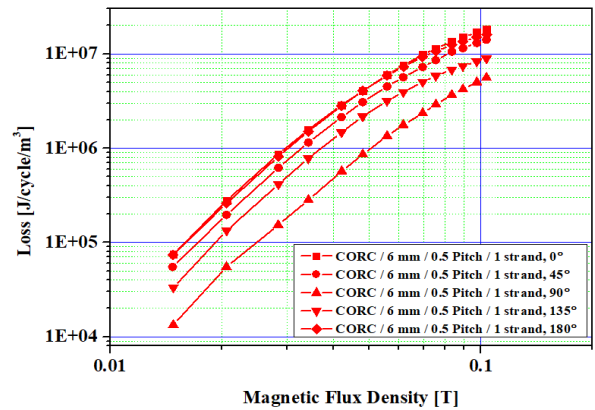


Fig. 6. Magnetization loss measurement result of 1 strand CORC with 180 mm pitch.

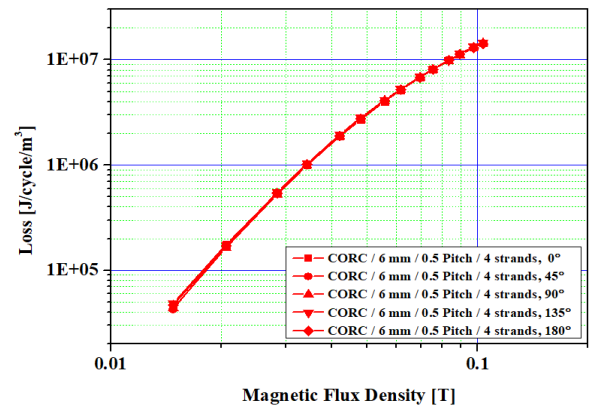


Fig. 7. Magnetization loss measurement result of 4 strands CORC with 180 mm pitch.

샘플의 피치가 LPC 측정영역과 동일할 경우 손실에 미치는 영향을 확인하기 위해 4 mm 폭 선재를 사용하여 TSTC 샘플을 제작하였다. 자세한 샘플의 사양은 표 2에 나타났다. 샘플의 자화손실 측정은 샘플의 길이 방향을 축으로 하여 0° 부터 45° 씩 180° 까지 총 5회 측정을 진행하였다. 자화손실 측정 결과는 각각의 손실의 비교를 용이하게 하기 위해 샘플링 한 손실 데이터를 초전도 선재 영역의 체적으로 나누어 손실 밀도로 비교하였다. 그림 6~그림 9는 180 mm 피치로 제작된 CORC 및 TSTC의 손실 측정 결과를 나타낸다. 픽업코일의 측정길이가 90 mm 이므로 샘플들의 0.5 피치에 해당하는 영역에서 자화손실이 측정된다.

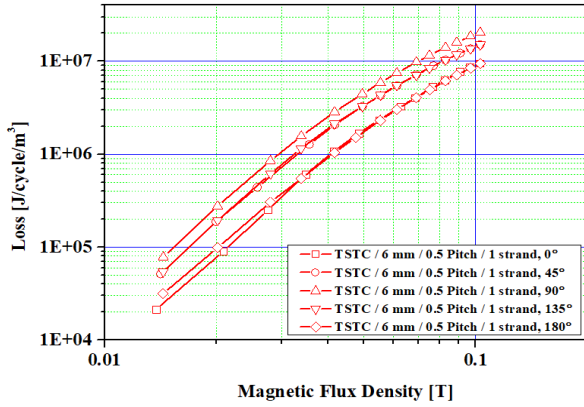


Fig. 8. Magnetization loss measurement result of 1 strand TSTC with 180 mm pitch.

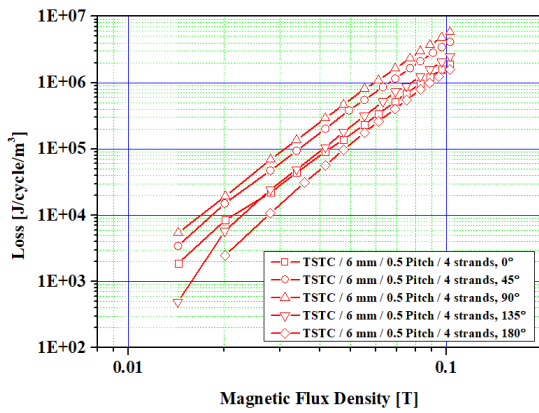


Fig. 9. Magnetization loss measurement result of 4 strands TSTC with 180 mm pitch.

CORC에서 1 개의 초전도 선재만 있는 경우에는 0.5 피치에 해당하는 측정 영역 내의 초전도 선재가 수직방향 자기장을 경험하는 영역이 회전에 따라 달라지게 되므로 그림6에서 보는 바와 같이 회전에 따른 자화손실 차이가 크게 발생한다. 여러 개의 초전도 선재가 포머 위에 대칭적으로 배치된 경우에는 단면상의 각도 차이만 있을 뿐 각각의 가닥이 전부 동일한 형상으로 권선되어 있으므로 회전되어도 수직방향 자기장을 경험하는 영역의 형상이 거의 동일하게 나타난다. 따라서, 그림7에서 보는 바와 같이 회전에 따른 손실의 차이가 발생하지 않음을 확인할 수 있다. 그림 8과 그림 9에서 알 수 있듯이 TSTC에서는 한가닥의 경우뿐만 아니라 여러 가닥을 사용하여 샘플을 제작하더라도 회전에 따라 손실의 차이가 발생함을 알 수 있다. 이는 선재를 포머에 감는 것이 아니라 자체를 꼬아서 제작하므로 외부 자기장의 방향에서 보면 1개의 선재 경우나 다수개의 선재가 적층된 경우나 동일한 자장성분을 경험하게 되기 때문이다. 이러한 회전에 따른 측정손실의 차이를 해결하기 위해서는 측정 영역의 길이와 회전 피치를 정수배의 관계로 설정하여야 한다. LPC의 픽업코일 측정 영역 내에 회전 피치를 정수배로 포함시키면 샘플의 회전과 상관없이 수직방향 자기장을 모두 동일하게 경험하게 되므로 측정되는 자화손실은 회전과 무관하게 나타날 것이다. 이를 확인하기 위해 본 연구진은 90 mm 피치를 가지는 TSTC를 제작하여 회전에 따른 자화손실을 측정하였다.

그림 10~그림 13은 90 mm 피치를 가지는 TSTC 샘플의 자화손실 측정결과를 나타낸다.

픽업코일의 측정 영역과 회전 피치가 동일할 경우, 회전에 따라 손실의 차이가 발생하지 않는 결과를 확인할 수 있다. 선재의 적층 수를 증가시키더라도 동일한 현상이 나타나는 것을 알 수 있다. 즉, TSTC의 경우에는 CORC와는 다르게 픽업코일 내의 측정 영역과 TSTC의 회전 피치를 동일하게 가지거나, 정수배의 피치를 포함하여야만 정확한 자화손실

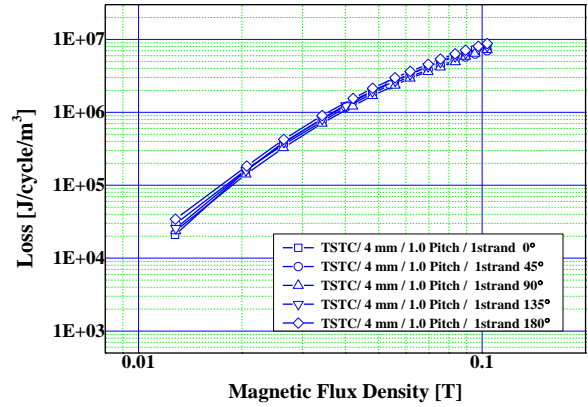


Fig. 10. Magnetization loss measurement result of 1 strand TSTC with 90 mm pitch.

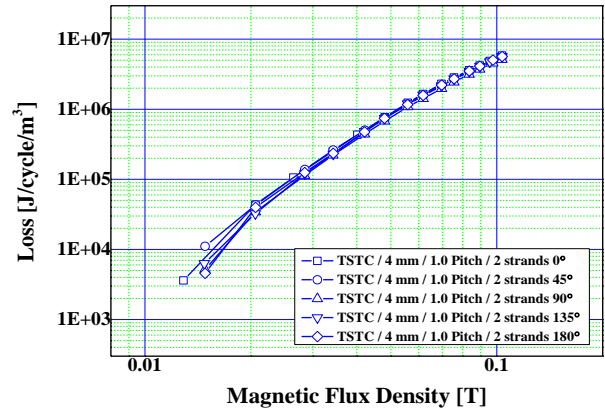


Fig. 11. Magnetization loss measurement result of 2 strands TSTC with 90 mm pitch.

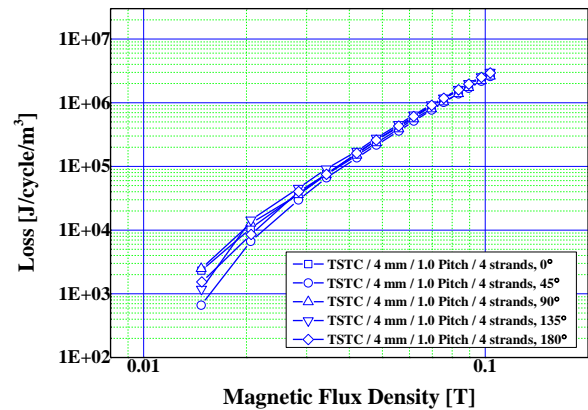


Fig. 12. Magnetization loss measurement result of 4 strands TSTC with 90 mm pitch.

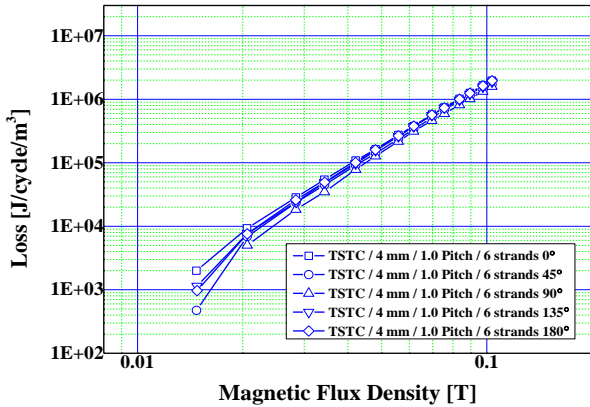


Fig. 13. Magnetization loss measurement result of 6 strands TSTC with 90 mm pitch.

값을 측정할 수 있다. 추가적으로, 선재의 적층 수를 증가시킬 경우 전체적으로 자화손실이 감소되는 것을 확인할 수 있다. 이는 선재의 적층으로 인해 발생하는 자기차폐 현상의 영향이며 TSTC의 경우 사용 선재를 증가시킬수록 CORC보다 높은 자화손실 감소 효과를 가지게 된다.

### 5. 결론

CORC 및 TSTC 등 대전류용 도체의 경우, 교류손실에 대한 정확한 예측 및 측정이 필요하다. LPC 시스템을 이용한 자화손실의 측정의 경우 측정 영역과 샘플의 형상 사이의 상관관계를 명확하게 알기 위해 여러 형상의 샘플을 제작하여 자화손실을 측정하고 비교하였다. 이를 통해 CORC의 경우, 복수의 선재를 병렬 배치하게 된다면 피치와 관계없이 회전 때 따른 자화손실 측정값의 차이가 발생하지 않는 것을 확인하였다. 그러나, TSTC의 경우 LPC 측정영역과 피치의 길이가 동일하거나 정수배를 가져야만 회전에 따른 자화손실 측정값의 차이가 발생하지 않는다는 것을 확인하였다. 따라서 TSTC의 자화손실을 측정할 경우에는 샘플의 피치와 측정 영역의 길이에 주의하여야 한다.

### ACKNOWLEDGMENT

“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 (2023R1A2C1005911), 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] W. H. Fietz, M. J. Wolf, A. Preuss, R. Heller, and K. -P. Weiss, “Highcurrent HTS cables: Status and actual development,” *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 26, no. 4, Art. no. 4800705, 2016.
- [2] M. Takayasu, L. Chiesa, L. Bromberg, and J. V. Minervini, “Cabling method for high current conductors made of HTS tapes,” *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 21, no. 3, pp. 2340-2344, 2011.
- [3] J. Souc, et al., “Low AC loss cable produced from transposed striated CC tapes,” *Supercond. Sci. Technol.*, vol. 26, no. 7, Art. no. 075020, 2013.
- [4] D C van der Laan, et al., “Status of CORC cables and wires for use in high-field magnets and power systems a decade after their introduction,” *Supercond. Sci. Technol.*, vol. 32, no. 3, Art. no. 033001, 2019.
- [5] M. Takayasu, L. Chiesa, Nathaniel C. Allen, and J. V. Minervini, “Present Status and Recent Developments of the Twisted Stacked-Tape Cable Conductor,” *Supercond. Sci. Technol.*, vol. 26, no. 2, Art. no. 6400210, 2016.
- [6] M. Vojenciak, et al., “Magnetization ac loss reduction in HTS CORC cables made of striated coated conductors,” *Supercond. Sci. Technol.*, vol. 28, no. 10, Art. no. 104006, 2015.
- [7] J. Han, W. -S. Kim, K. Choi, and J. -K. Lee, “Magnetization loss of multilayered CORC according to various winding types,” *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 32, no. 6, Art. no. 5900705, 2022.
- [8] Jinwoo Han, et al., “Magnetization Loss of Multi-Layered CORC According to Various Winding Types,” *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol.32, no.6, Art. no.5900705, 2022
- [9] 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.