

# Stress analysis of high-temperature superconducting wire under electrical/magnetic/bending loads

Dongjin Seo<sup>a</sup>, Yunjo Jung<sup>a</sup>, Hong-Gun Kim<sup>a</sup>, Hyung-Seop Shin<sup>b</sup>, and Young-Soon Kim<sup>a,\*</sup>

<sup>a</sup> Department of Carbon Convergence Engineering and Institute of Carbon Technology, Jeonju University, Jeonju, 55069, Korea

<sup>b</sup> Department of Mechanical Design Engineering, Andong National University, Andong, 36729, Korea

(Received 8 December 2023; revised or reviewed 29 December 2023; accepted 30 December 2023)

## Abstract

The Second-generation high-temperature superconducting (HTS) Rare-Earth Barium Copper Oxide (REBCO) wire is a composite laminate having a multi-layer structure (8 or more layers). HTS wires will undergo multiple loads including the bending-tension loads during winding, high current density, and high magnetic fields. In particular, the wires are subjected to bending stress and magnetic field stress because HTS wires are wound around a circular bobbin when making a high-field magnetic. Each of the different laminated wires inevitably exhibits damage and fracture behavior of wire due to stress deformation, mismatches in thermal, physical, electrical, and magnetic properties. Therefore, when manufacturing high-field magnets and other applications, it is necessary to calculate the stress-strain experienced by high-temperature superconducting wire to present stable operating conditions in the product's use environment. In this study, the finite element model (FEM) was used to simulate the strain-stress characteristics of the HTS wire under high current density and magnetic field, and bending loads. In addition, the result of obtaining the neutral axis of the wire and the simulation result was compared with the theoretical calculation value and reviewed. As a result of the simulation using COMSOL Multiphysics, when a current of 100 A was applied to the wire, the current value showed the difference of  $10^{-9}$ . The stress received by the wire was 501.9 MPa, which showed a theoretically calculated value of 500 MPa and difference of 0.38% between simulation and theoretical method. In addition, the displacement resulted is 30.0012  $\mu\text{m}$ , which is very similar to the theoretically calculated value of 30  $\mu\text{m}$ . Later, the amount of bending stress by the circular mandrel was received for each layer and the difference with the theoretically obtained the neutral axis result was compared and reviewed. This result will be used as basic data for manufacturing high-field magnets because it can be expanded and analyzed even in the case of wire with magnetic flux pinning.

**Keywords:** stress, superconducting wire, bending deformation, tensile force, neutral axis, COMSOL, finite element model

## 1. 서 론

자기장 하에서 REBCO 초전도 선재(wire)는 BSCCO 2212 선재에 비해 공학적 임계전류밀도가 높아 [1] 고자장 자석에 응용되고 있다. Hahn S. 등은 REBCO 선재로 45.5 Tesla 자장 [2]을 갖는 초전도 자석을 제작하였으며, Yoon S. 등은 SuNAM의 GdBCO 초전도층을 갖는 선재를 이용하여 자석[3,4]을 제작하여 이를 NMR/MRI 등의 분석/의료기기의 고자장 자석에 응용하고 있다 [5, 6]. REBCO 초전도 선재는 여러가지 재료가 다층의 박막 형태인 선재이며, 한국에서는 SuNAM[7], 미국에서는 Superpower, AMSC, 러시아에서는 SuperOX, 일본에서는 Fujikura, 중국에서는 Shanghai, Superconductor, Samri Advanced Materials 등의 회사들이 제작하고 있다.

이러한 초전도 선재를 응용하는데 있어 자석용 코일 및 케이블 기기 등에 적용할 때 권선 및 연선 과정에서 길이방향 및 폭방향으로 인장 및 굽힘 등의 힘을 가하여 변형을 일으키게 되고 초전도 특성의 저하가 발생하는 메커니즘을 규명하는 연구를 Shin. S. 그룹에서 활발히 연구하고 있다 [8, 9].

다층의 박막 형태인 선재는 초전도층 위에 은(Ag)을 증착하고 추가로 구리도금 공정한다. 초전도 한류기 제작용 선재는 은(Ag)층이 있는 선재를 사용하며, 한쪽 또는 양쪽을

모두 구리 도금공정하여 케이블 또는 고자기장 자석 제작에 사용하기도 한다 [10, 11]. Allen N.C., Peng X. 및 Boso D. P. 등은 Superpower의 SCS4050 선재와 SuNAM의 SCN041150 선재를 비틀림(Twist)과 굽힘(Bending)의 힘을 가할 때 선재가 받는 전기/열/기계적 거동을 구조적인 유한요소해석(Finite element analysis)으로 ANSYS®를 이용하여 규명하였다 [12-14]. 최근에 Pan Y.와 Shi Y. 등은 bending-tension을 선재에 가할 때 전기-기계적인 특성을 3D 형태로 COMSOL을 이용하여 해석하였다. 이러한 해석에 사용한 선재는 구리 라미네이션 선재이기에 구리의 기계적 특성이 포함된 결과이다 [15, 16].

하지만 구리가 없는 즉 은(Ag)층 까지만 있는 선재(Ag-stabilized coated conductor tape)는 초전도 한류기 등의 제작에 사용되기에 구리가 없는 기계적, 전자기적인 힘에 의한 초전도 선재의 균열거동에 대한 연구가 필요하다. 본 연구에서는 Table 1과 같이 임계전류가 77K, self-field에서 243A를 갖는 SuNAM의 SAN04의 선재를 사용하였다 [17]. SAN04 선재의 초전도층은 GdBCO이며 두께는 1~1.5  $\mu\text{m}$ 이고 Ag는 선재 위/아래 층에 ~3  $\mu\text{m}$  증착한 선재였다. 또한 해석은 COMSOL을 이용하여 전기적, 전자기적, 굽힘에 의한 선재가 받는 응력과 변형에 대해 분석한 결과와 이론적으로 증립축을 구한 결과와 비교하여 검토하였다.

\* Corresponding author: [kyscjb@jj.ac.kr](mailto:kyscjb@jj.ac.kr)

TABLE 1  
CHARACTERISTICS OF SAMPLE (SUNAM SAN04)

Processing of MgO	IBAD
Processing of Superconductor	RCE-DR
Thickness x width (mm)	0.11x4.02
GdBCO superconductor thickness (μm)	~1 to 1.5
Silver(Ag) thickness per side (μm)	~3
Critical current ( $I_c$ ) at 77 K and self-field (A)	~243

TABLE 2  
MATERIAL PROPERTIES OF THE SUBSTRATE AND THE SUPERCONDUCTING LAYER

Properties	STS	Superconductor
Density (kg/m <sup>3</sup> )	8,000	870
Young's modulus (GPa)	190	150
Poisson's ratio	0.3	0.3
Tensile yield strength (MPa)	840	80
Compressive yield strength (MPa)	215	100
Tensile ultimate strength (MPa)	505	100

2. 모델링 설계 및 유한요소 해석

SuNAM의 초전도 선재는 대부분의 재질이 STS 재질로 되어있으며, 이외에도 버퍼층, 초전도층 등 여러 가지 층으로 구성되어 있다. 하지만 90%이상의 재질이 STS인 점으로 인해 기계적인 힘은 STS에 의존적일 수밖에 없다. 상세한 재질의 성질은 아래 Table 2와 같다 [12-15].

2.1. 모델링

Table 1과 같은 SuNAM SAN04 초전도 선재를 COMSOL을 이용하여 전자기 및 구조해석을 진행하였다. 전자기 해석을 위해 길이(x축) 6 mm, 폭(y축) 4 mm, 두께(z축) 0.1 mm의 초전도 선재를 모델링 하였다. 또한 추가로 원형의 보빈에 선재를 감아 기계적인 힘(굽힘 응력)을 가한 기초연구를 토대로 시뮬레이션에 사용할 모델을 설계하였다. 굽힘은 Fig. 1과 같이 최소 반경 5 mm이고 최대 반경이 50 mm인 mandrel에 초전도층이 밖을 향하게 한번 굽힘(single

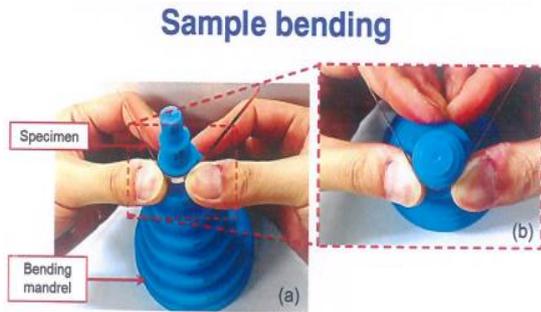


Fig. 1. Application bending deformation to Superconducting wire using the mandrel.

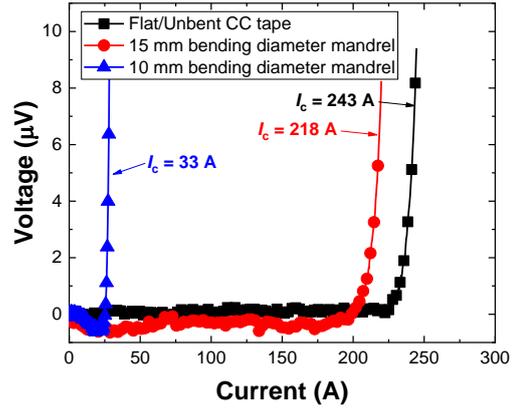


Fig. 2. I-V curves and Critical current of Ag stabilized HTS wire before and after bending application to samples.

bending) 다음 초전도 선재의 특성을 평가하였다. 은(Ag) 층이 있는 고온 초전도 선재의 굽힘(bending)과 이후 선재의 임계전류 특성을 Fig. 2에 나타내었다. 임계전류의 측정은 clipped voltage taps 측정 방법으로 측정하였다 [18]. 굽힘을 하지 않은 선재의 임계전류는 243 A이고 반경이 7.5 mm mandrel에 굽힘 경우는 218 A, 5 mm 경우는 33 A이었다.

Shi Y. 등 [16]은 Fujikura, Shanghai Superconductor, Samri Advanced Materials사의 선재들을 굽힘 반경 2.5 mm ~ 8 mm에서 임계전류 거동을 조사하였다. 본 연구에서와 같이 초전도층을 바깥에 두고 굽힐 경우 Shanghai Superconductor, Samri Advanced Materials사의 선재와 같은 경향을 보이는 것을 확인하였다. Shanghai Superconductor 선재의 경우 3 mm 반경 이하에서 임계전류가 ~60% 이상 감소, Samri Advanced Materials사의 선재는 4.5 mm 직경 이하에서 임계전류가 50%까지 감소하였다. Fujikura 경우는 6.5 mm 반경에서 20% 감소를 보였으나 6 mm 반경에서 급격하게 80% 감소를 보이고 있다. 위의 3사의 선재는 구리층까지 있으며 본 연구에서는 silver층 까지만 있는 선재를 7.5 mm 반경에서 10% 저하, 5 mm 직경에서는 85% 이상으로 임계전류가 저하되었다.

5 mm 반경의 mandrel에 굽힘 선재의 균열여부를 확인하고자 Ag 층을 제거하고 초전도층의 표면을 SEM으로 보았으며 이 결과를 Fig. 3에서 보면 표면은 5 mm 반경에서 굽힘 이후 GdBCO 초전도층의 표면 사진으로 균열이 있는

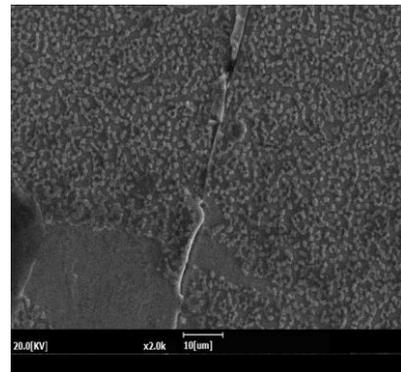


Fig. 3. SEM image of GdBCO superconducting layer after bending at 5 mm radius mandrel.

TABLE 3  
CRITICAL CURRENT MEASURED AT EACH BENDING RADIUS.

Bending radius	I <sub>c</sub>	Bending strain calculated at superconducting layer
7.5 mm	218 A	$\epsilon_b = 0.73 \%$ , $\epsilon_{@REBCO} = 0.66 \%$
5 mm	33 A	$\epsilon_b = 1.09 \%$ , $\epsilon_{@REBCO} = 0.98 \%$

것을 확인하였다. 또한 7.5 mm 반경에서는 균열이 발견되지 않았다.

Table. 3과 같이 선재 표면에서 굽힘 변형률( $\epsilon_b$ )은 반경이 7.5 mm 에서는 0.73%, 5 mm에서는 1.09% 이고 초전도층의 변형률[19]은 각각 0.66%, 0.98% 였다.

2.2. 초전도 선재의 유한요소 법 해석

유한요소해석 법에 따른 전자기 및 구조해석은 COMSOL 상용프로그램을 이용하여 진행하였으며, 전자기 해석과 구조해석을 별개로 진행했다. 해석에 사용한 매개변수는 다음 Table 2와 같다.

2.3. 초전도 선재의 자기장 및 전기장에서의 응력 해석

전자기 해석은 외부자기장이 1 T인 상태에서 진행하였으며, 초전도 선재에 100 A의 전류를 순차적으로 흘려 보내 선재의 전류를 측정하였다. Fig. 4에서와 같이 전류가 흐를 때 자속은 모서리 부분에서 가장 많은 분포도를 보였으며, 주변으로 원형으로 퍼지는 형태를 띠었다.

Fig. 5과 같이 전류가 흐를 때, 전류밀도는 선재의 테두리에서부터 차올라 서서히 중심부로 차오르는 양상을 보인다. 즉, Fig. 4와 Fig. 5의 FEM 결과 선재는 운전 중에 있어서 중심부 보다는 가장자리에서 비교적 많은 전기/자기적 영향이 미친다는 것을 알 수 있다.

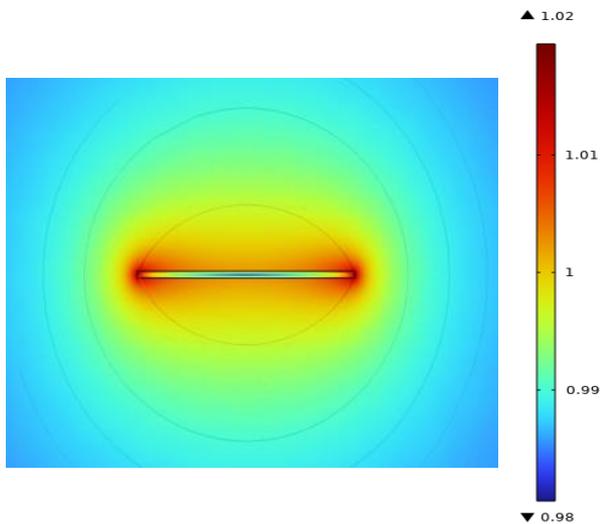


Fig. 4. Magnet flux distribution calculated at 100 A and 1 T condition.

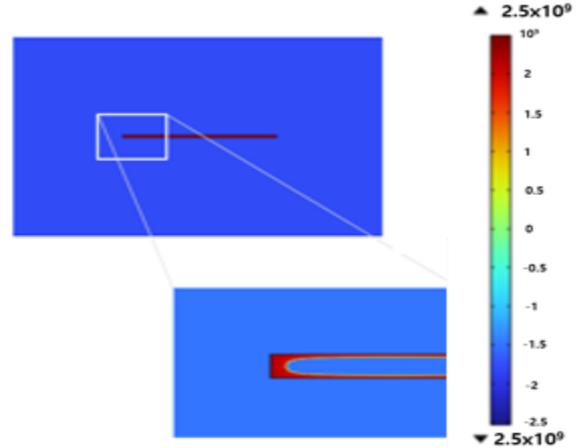


Fig. 5. Current density distribution at  $2 \times 10^9$  A/m<sup>2</sup>.

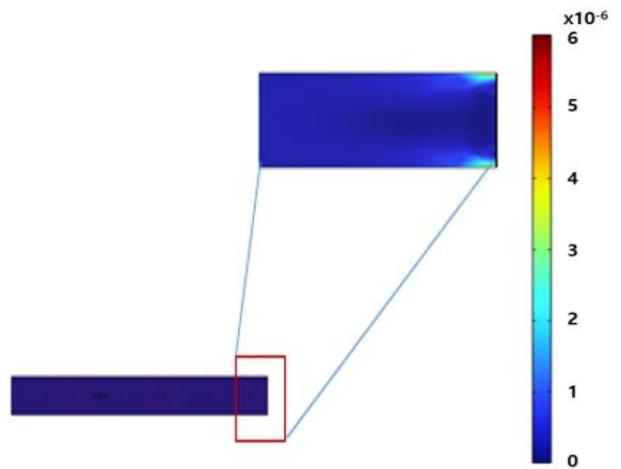


Fig. 6. Stress induced in the superconducting wire at 100 A applied current condition.

굽힘 응력을 가하지 않는 상태에서 전류(100A)에 의한 물리적으로 선재가 받는 힘을 해석한 결과는 Fig. 6이다. 즉 전기의 흐름에 의해 선재가 받는 응력은 거의 0에 근접한 힘을 받았으며, 이는 전류에 의한 선재의 응력 변형이 무시될 수 있는 결과이다.

2.4. 초전도 선재의 구조 해석

아래 Fig. 7과 같이 인장을 가한 후 변형이 가능하도록 선재의 중심부에 구속조건을 설정한 후 좌우방향으로 인장력을 200[N]의 힘을 가하였다.

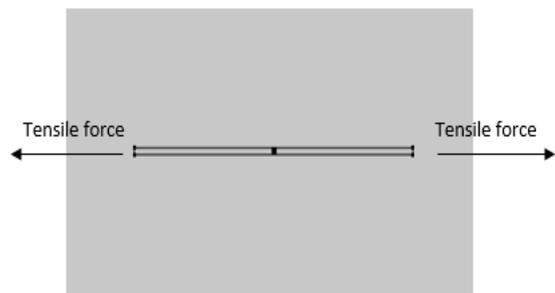


Fig. 7. Tensile loading situation to superconducting wire.

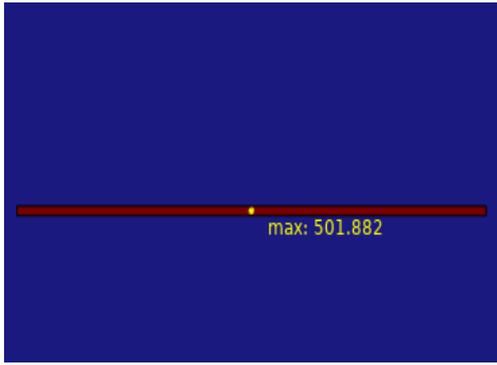


Fig. 8. Distribution of axial tensile stress(MPa) to superconducting wire.

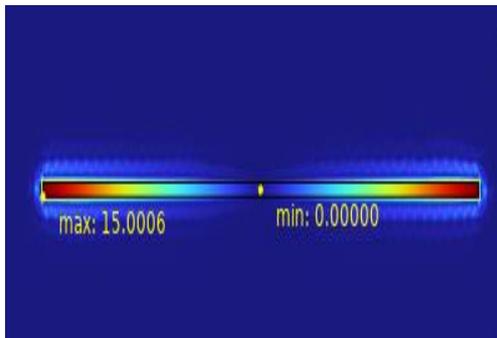


Fig. 9. Distribution of displacement( $\mu\text{m}$ ) induced in the superconducting wire.

구조해석 결과 좌우방향으로 인장력을 가했을 때 선재가 받는 응력은 아래 Fig 8, 9와 같이 응력은 501.9 MPa이며, 변위는 한쪽 방향으로 15.0006 즉 양쪽으로는 30.0012  $\mu\text{m}$ 가 나왔다. 이는 이론적으로 계산한 값인 500 MPa, 30  $\mu\text{m}$ 의 값과 0.004%의 차이를 보였다. 본 연구 결과는 6 mm 길이 선재가 양쪽으로 15.0006  $\mu\text{m}$  증가하여 총 30.0012  $\mu\text{m}$  변형이 되었기에 변형률 0.5%이며 이때 선재가 받는 응력은 최대 501.9 MPa이다. Ag 위에 구리를  $\sim 20 \mu\text{m}$  라미네이션 되어 있는 선재의 경우 77K에서 Strain 0.005에서  $\sim 650\text{MPa}$ 의 응력 [12,13]을 보였으며  $\sim 293 \text{K}$ (실온)에서는  $\sim 300 \text{MPa}$ 의 응력 [14,15]을 보이고 있다. 즉 실제 초전도 선재가 적용되는 77K 온도에서는 높은 응력을 받기에 강성(Stiffness)이 되며 잘 늘어나거나 휘지 않는다. 본 연구에서 구리가 없는 선재의 경우는 실온에서 501.9 MPa이며 구리층이 있는 선재에 비해 응력이  $\sim 150 \text{MPa}$  높은 것을 확인하였고, 이에 따라 변형에 따른 저항이 크다는 것을 알 수 있다.

기초연구 자료를 토대로 반경 7.5 mm mandrel에 초전도 선재를 감아 굽힘 응력을 가할 수 있는 모델을 설계하였다. 모델 모습은 아래 Fig 10과 같다

Table 1의 SuNAM SAN04 선재 구조와 Table 2의 각 층의 재료 특성을 통하여 아래 Fig 11과 같이 이론적인 선재의 중립축을 찾아 각층에서 받는 굽힘력을 계산한 값과 구조해석을 통해 계산한 수치를 비교하였다. 중립축은 초전층의 반대 즉 STS 기판 쪽에서 36.44  $\mu\text{m}$ 이며, 이때 굽힘 응력은 1,320 MPa이다. 또한 수치해석에 의한 굽힘응력은 Fig 12와 같이 1,373 MPa이었다.

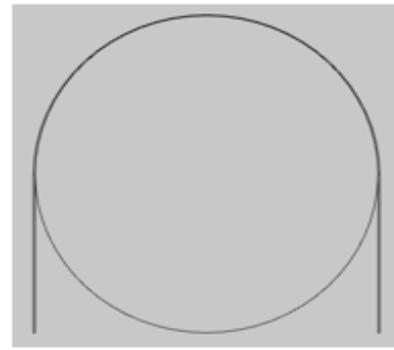


Fig. 10. Schematic diagram showing combined loading mode of bending and tensile force.

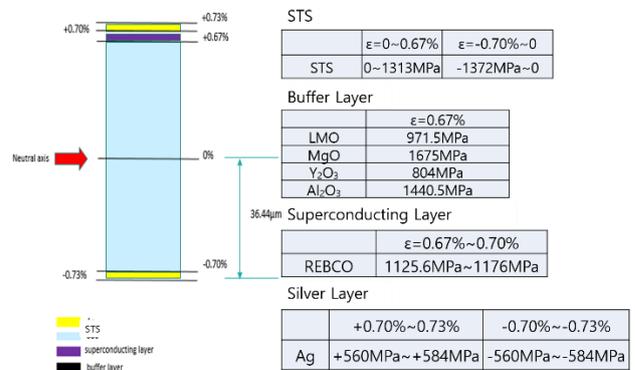


Fig. 11. Analytically calculated bending stress and Neutral axis.

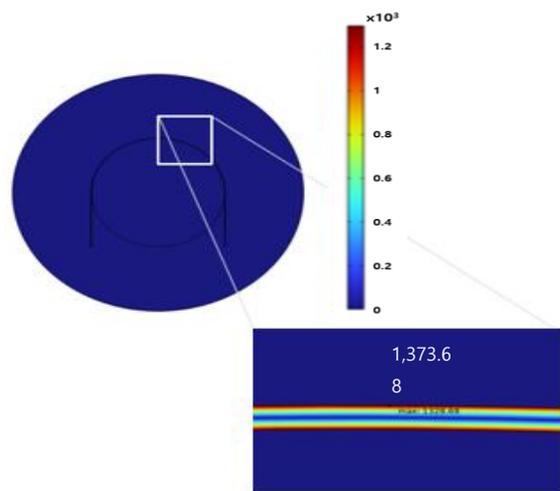


Fig. 12. Bending stress(MPa) of finite numerical analysis.

인장(Tension)과 굽힘(bending)에 의한 응력 및 변위를 Table 4에 표시하였다. 구조해석 결과 최대 약 1,373 MPa의 응력을 받았으며, 이는 이론적으로 계산한 값과 53 MPa(4%)의 차이를 보였다. 본 구조해석의 결과는 탄성변형에 의한 해석으로 추후 소성변형에 의한 구조해석을 진행하는데 기초 자료로 활용할 예정이다.

TABLE 4  
COMPARISON OF ANALYTICAL AND NUMERICAL ANALYSIS

Properties	Analytical method	Numerical analysis	Difference (%)
Peak stress (Tension, MPa)	500	501.9	0.38
Max displacement (Tension, $\mu\text{m}$ )	30	30.0012	0.004
Max stress (Bending, MPa)	1,320	1,373	4.01

### 3. 결론

본 연구에서는 고온초전도 REBCO 선재의 적용 환경을 상정하여 선재에 가해진 영향을 평가하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 초전도 선재에 전류와 자기장이 가해질 때, 선재는 실험적으로 확인한 전류밀도 값을 넘어 설수 없으며, 선재의 표면으로부터 전류가 차오르며 가운데까지 차는 형태를 가진다. 또한 전기장과 자기장에 의한 파손은 거의 볼 수 없다.
- (2) 인장력에 대한 초전도 선재의 구조해석을 진행한 결과, 외력이 작용하지 않고 전류만 흐를 경우에는 선재에 가해지는 응력이 거의 0에 근접한 수치를 나타내었고 선재 파손은 나타나지 않았음. 선재의 길이방향으로 인장력을 가할 경우, 선재가 받는 응력과 변위는 이론적으로 계산한 값과 유사하였고 작은 오차를 보였다.
- (3) 기초연구를 토대로 mandrel에 선재를 감아 굽힘 변형을 가할 경우, 굽힘변형률 1.09%에서 약 90%의 임계전류 저하를 가져왔고, 이를 COMSOL 프로그램을 이용하여 기계적 거동을 평가하면, 인장응력 1,320MPa로 계산되었고, 이는 이론적으로 구한 계산값 1,373 MPa와 4%의 차이를 보여 높은 신뢰를 보였다.
- (4) 고온초전도 선재는 권선 및 작동 과정에서 기계적 하중과 변형에 의해 임계전류의 저하가 일어나는데, 선재의 85%이상을 차지하는 기판층 (STS) 특성상 전체적으로 기판 재질에 크게 의존하는 것을 확인하였다. 따라서 본 연구는 안정화층 즉 구리층의 유/무에 따른 초전도 선재의 권선(bending)에 변형률과 응력에 대한 기초 자료로 활용이 기대된다.

### ACKNOWLEDGMENT

This work was supported by the Ministry of Industry, Trade, and Energy (MITE) and by the Korea Evaluation Institute of Industrial Technology(KEIT) (No. 20020421)

### REFERENCES

- [1] <https://nationalmaglab.org/magnet-development/applied-superconductivity-center/plots>, "Comparisons of superconductor

- critical current densities, Engineering Critical Current Density vs. Applied Field for Superconductors Available in Long Lengths," The National High Magnetic Field Laboratory, Last modified on 21 June 2023.
- [2] S. Hahn, K. Kim, K. Kim, X. Hu, T. Painter, I. Dixon, S. Kim, K. R. Bhattarai, S. Noguchi, J. Jaroszynski, and D. Larbalestier, "45.5-tesla direct-current magnetic field generated with a high-temperature superconducting magnet," *Nature*, vol. 570, no. 7762, pp. 496-499, 2019.
- [3] S. Yoon, J. Kim, K. Cheon, H. Lee, S. Hahn, and S.-H. Moon, "26 T 35 mm all-GdBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-x</sub> multi-width no-insulation superconducting magnet," *Supercond. Sci. Technol.*, vol. 29, pp. 04LT04, 2016.
- [4] K. Kim, K. R. Bhattarai, J. Y. Jang, Y. J. Hwang, K. Kim, S. Yoon, S. Lee, and S. Hahn, "Design and performance estimation of a 35 T 40 mm no-insulation all-REBCO user magnet," *Supercond. Sci. Technol.*, vol. 30, pp. 065008, 2017.
- [5] J. Y. Jang, Y. J. Hwang, J. Kim, S. Song, G. Kim, K. Choi, S. Hahn, M. Ahn, and S. Lee, "Experimental Study of a Room-Temperature Shimming Technology Employing Genetic Algorithm for NMR/MRI Superconducting Magnets," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 33, no. 5, pp. 4300705, 2023.
- [6] K. L. Kim, S. Yoon, K. Cheon, J. Kim, H. Lee, S. Lee, D. L. Kim, and S. Hahn, "400-MHz/60-mm All-REBCO Nuclear Magnetic Resonance Magnet: Magnet Design," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 26, pp. 4302604, 2016.
- [7] Jae-Hun Lee, et al., "RCE-DR, a novel process for coated conductor fabrication with high performance," *Supercond. Sci. Technol.*, vol. 27, pp. 044018, 2014.
- [8] M. A. E. Diaza, H. -S. Shin, H. -S. Jung, and J. Lee, "Performance evaluation of differently structured RCE-DR GdBCO coated conductor tapes under uniaxial tension at 77 K," *Progress in Superconductivity and Cryogenics*, vol. 24, no.1, pp. 13-17, 2022.
- [9] M. B. de Leon, A. R. Nisay, M. A. Diaz, and H. -S. Shin, "Widthwise Bending-Induced Response of Critical Current in REBCO Tapes," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 33, no. 5, pp. 1-5, 2023, Art no. 8401105, doi: 10.1109/TASC.2023.3263332.
- [10] M. Wang, Z. Li, Y. Yan, M. Zhang, J. Sheng, Z. Hong, Z. Jin, Y. Iwasa, and T. Qu, "A novel REBCO conductor design to reduce screening-current field in REBCO magnets," *Phys. Scr.*, vol. 94, pp. 105803, 2019.
- [11] U. Floegel-Delor, R. Rothfeld, T. Riedel, P. Schirrmeister, R. Koenig, V. Kantarbar, and F. N. Werfel, "Progress in Copper Plating Reel-to-Reel Technology in HTS-Coated Conductor Fabrication," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 27, pp. 6601705, 2017.
- [12] N. C. Allen, L. Chiesa, and M. Takayasu, "Structural modeling of HTS tapes and cables," *Cryogenics*, vol. 80, no. 3, pp. 405-418, 2016.
- [13] X. Peng and H. Yong, "Structural analysis of REBCO coated conductors and quasi-isotropic strands under bending using continuum shell element," *Cryogenics*, vol. 133, pp. 103701, 2023.
- [14] D. P. Boso, A. Musso, E. Pilastro, and P. L. Ribani, "Numerical Investigation on the Thermo-Mechanical Behavior of HTS Tapes and Experimental Testing on Their Critical Current," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 30, no. 4, 2020.
- [15] Y. Pan and P. Gao, "Analysis of mechanical behavior and electromechanical properties of REBCO-coated conductor tapes under combined bending-tension loads using numerical methods," *Supercond. Sci. Technol.*, vol. 36, pp. 045006, 2023.
- [16] Y. Shi, A. Dai, T. Ma, and W. Liu, "Effect of Bending Strain on the Current-Carrying Performance of Copper-Laminated REBCO Tape," *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*, vol. 35, pp. 647-655, 2022.
- [17] S. Moon, "The status of development and commercial of second generation HTS long wire at SuNAM Co. Ltd.," *Ceramist*, vol. 15, no. 6, pp.16-19, 2012.
- [18] H. -S. Shin, A. Nisay, M. Dedicataria, and K. Sim, "Establishment of an easy I<sub>c</sub> measurement method of HTS superconducting tapes using clipped voltage taps," *Progress in Superconductivity and Cryogenics (PSAC)*, vol. 16, no. 2, pp. 29-32, 2014.
- [19] M. B. de Leon, M. J. Dedicataria, and H. S. Shin, "Determination of winding diameter based on bending strain analysis for REBCO coated conductor tapes," *Journal of the Korea Institute of Applied Superconductivity and Cryogenics*, vol. 14, no. 2, pp. 8-11, 2012